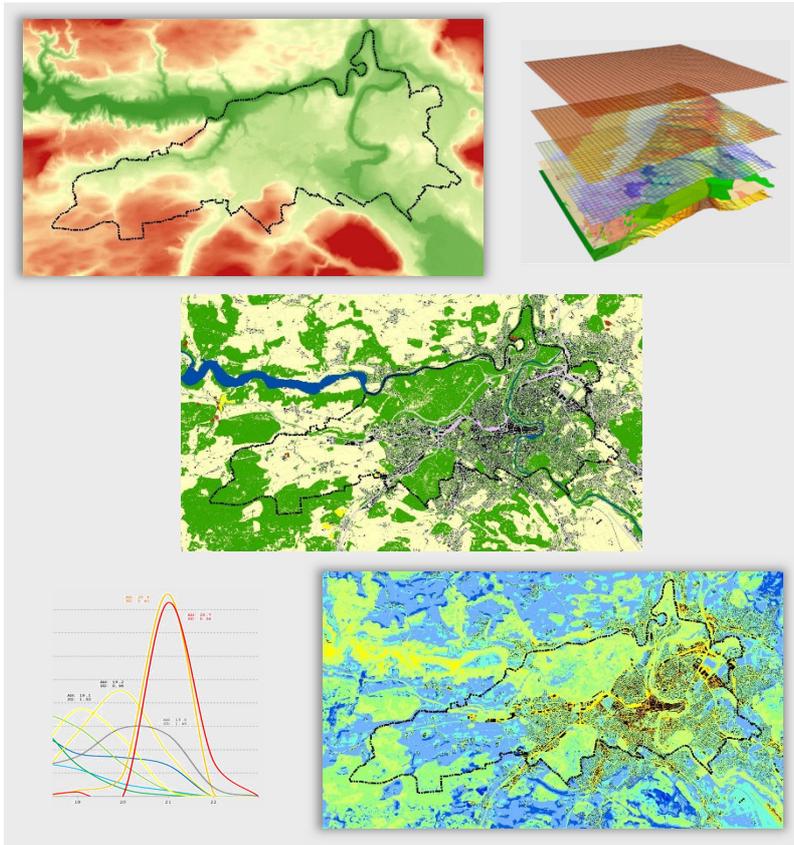


Klimaökologische Situation in der Stadt Bern: Modellbasierte Klimaanalyse

Abschlussbericht



Auftraggeber:
Stadt Bern
Stadtplanungsamt
Zieglerstrasse 62
3001 Bern



GEO-NET Umweltconsulting GmbH

Grosse Pfahlstrasse 5a
3 0 1 6 1 Hannover
Tel. (0511) 3887200
FAX (0511) 3887201
www.geo-net.de



Inhaltsverzeichnis

Seite:

Abbildungsverzeichnis.....	II
Tabellenverzeichnis.....	III
Glossar.....	IV
Zusammenfassung	VI
1. Aufgabenstellung	1
2 Datengrundlage und Aufbau der Geodatenbasis für die Modellrechnungen .	3
2.1 Eingangsdaten	6
3. Methode der modellgestützten Siedlungsklimaanalyse.....	8
3.1 Das Stadtklimamodell FITNAH 3D	8
3.2 Synoptische Rahmenbedingungen.....	9
3.3 Abgrenzung der klimaökologischen wirksamen Nutzungsstrukturen.....	11
3.4 Klimatische Grundlagen	12
3.4.1 Aktuelles Klima an der Wetterstation Bern/Zollikofen	13
3.4.2 Beobachteter Klimawandel an Wetterstationen	14
3.4.3 Hauptanströmrichtung.....	15
3.4.4 Klimawandelszenario	16
4. Ergebnisse der Klimamodellierung.....	21
4.1 Nächtliches Temperaturfeld.....	21
4.2 Physiologisch Äquivalente Temperatur.....	24
4.3 Autochthones Windfeld	27
4.4 Kaltluftvolumenstrom	29
5 Klimaanalysekarte.....	35
6 Planungshinweiskarte Tagsituation	38
6.1 Bewertung der Tagsituation.....	38
6.2 Ergebnis Tagsituation	39



7	Kaltluftsystem	46
8	Massnahmenkatalog Siedlungsklima	48
9	Literatur	55

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1:	Prozessorientierte Analyse.....	1
Abb. 2.1:	Exemplarische Referenzflächen für die Siedlungstypologie „Arbeiten/Mischnutzung“ am Beispiel Bern Wankdorf sowie abgeleitete Mischpixelfläche „Arbeiten“ am Beispiel Schermerareal sowie Nachnutzung Areal Schermenweg	5
Abb. 2.2:	Rasterdarstellung in Mischpixelflächen am Beispiel Gaswerk	5
Abb. 2.3:	Geländehöhe im Modellierungsgebiet.....	6
Abb. 2.4:	Nutzungsstruktur im Stadtgebiet	7
Abb. 3.1:	Temperaturverlauf und Vertikalprofil der Windgeschwindigkeit zur Mittagszeit für verschiedene Landnutzungen	10
Abb. 3.2:	Schema der Wertezuordnung zwischen Flächen- und Punktinformation.....	11
Abb. 3.3:	Prinzipskizze Kaltluftleitbahn	12
Abb. 3.4:	Klimadiagramm Station Bern / Zollikofen, Normperiode 1991 – 2020	13
Abb. 3.5:	Entwicklung der sommerlichen Temperatur für die Nordschweiz unter 1.000 m ab 1864 bis heute im Vergleich zur Periode 1961 – 1990	14
Abb. 3.6:	Entwicklung der sommerlichen Niederschlagssummen für die Nordschweiz unter 1.000 m ab 1864 bis heute im Vergleich zur Periode 1961 – 1990	15
Abb. 3.7:	Windrosen der Station Bern/Zollikofen 365 m ü.M. für die Sommermonate Juni, Juli und August (Quelle: Meteoschweiz 2020c).	16
Abb. 3.8:	Anthropogener Strahlungsantrieb der verschiedenen IPCC-Klimaszenarien.....	17
Abb. 3.9:	Gemessene und projizierte Abweichung der sommerlichen Lufttemperaturen von der Normperiode 1981-2010 in den Regionen Mittelland und Voralpen (NCCS 2018)	18
Abb. 3.10:	Entwicklung der Sommer- und Hitzetage an der Station Bern/Zollikofen.	19
Abb. 4.1:	Temperaturfeld Gegenwart im Stadtgebiet Bern zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens.....	23
Abb. 4.2:	Temperaturfeld Zukunftsszenario 2060 im Stadtgebiet Bern zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens	24
Abb. 4.3:	PET Gegenwart zum Zeitpunkt 14 Uhr mittags (2m ü. Grund).....	26
Abb. 4.4:	PET Zukunftsszenario 2060 zum Zeitpunkt 14 Uhr (2m ü. Grund)	26
Abb. 4.5:	Prinzipskizze Flurwind	27



Abb. 4.6: Nächtliches Windfeld Gegenwart im Bereich Europaplatz zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens .. 29

Abb. 4.7: Prinzipskizze Kaltluftvolumenstrom 30

Abb. 4.8: Veranschaulichung der Standardisierung zur vergleichenden Bewertung von Parametern 31

Abb. 4.9: Kaltluftvolumenstrom Gegenwart im Modellgebiet zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens 32

Abb. 4.10: Kaltluftvolumenstrom Gegenwart zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens..... 33

Abb. 4.11: Kaltluftvolumenstrom Zukunftsszenario zum Zeitpunkt 4 Uhr 34

Abb. 5.1: Klimaanalysekarte Gegenwart 36

Abb. 5.2: Klimaanalysekarte Zukunftsszenario 2060 37

Abb. 6.1: Planungshinweiskarte Tagsituation Gegenwart 40

Abb. 6.2: Flächenanteile der bewerteten Nutzungsstrukturen im Stadtgebiet Bern
(Tagsituation) - Gegenwart 43

Abb. 6.3: Planungshinweiskarte Tagsituation Zukunftsszenario 2060 44

Abb. 6.4: Flächenanteile der bewerteten Nutzungsstrukturen im Stadtgebiet Bern
(Tagsituation) – Zukunftsszenario 2060 45

Abb. 7.1: Gegenwärtiges Kaltluftsystem im Stadtgebiet Bern..... 47

Abb. 8.1: Klimatisch günstige Ausgestaltung von Freiflächen 49

Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1: Nutzungskategorien der Klimamodellierung 3

Tab. 2.2: Übersicht über die unterschiedlichen Datenquellen mit Jahr und Quelle..... 4

Tab. 4.1: Zuordnung von Schwellenwerten für den Bewertungsindex PET während der Tagesstunden
(nach VDI 2004)..... 25

Tab. 4.2: Qualitative Einordnung des Kaltluftvolumenstroms..... 31

Tab. 6.1: Zuordnung von Schwellenwerten für den Bewertungsindex PET
während der Tagesstunden..... 39

Tab. 6.5: Gegenwärtige Bioklimatische Belastungssituation am Tage, deren Flächenanteile und
abgeleitete allgemeine Planungshinweise 41

Tab. 6.6: Gegenwärtige Flächenanteile der Aufenthaltsqualität von Grünarealen am Tage und
abgeleitete allgemeine Planungshinweise 42

Tab. 8.1: Empfehlungen raumeinheitenspezifischer siedlungsklimatisch wirksamer Massnahmen
für die Stadt Bern 52



Glossar

Albedo: Rückstrahlvermögen einer Oberfläche (Reflexionsgrad kurzwelliger Strahlung). Verhältnis der reflektierten zur einfallenden Lichtmenge. Die Albedo ist abhängig von der Beschaffenheit der bestrahlten Fläche sowie vom Spektralbereich der eintreffenden Strahlung.

Allochthone Wetterlage: Durch grossräumige Luftströmungen bestimmte Wetterlage, die die Ausbildung kleinräumiger Windsysteme und nächtlicher Bodeninversionen verhindert. Dabei werden Luftmassen, die ihre Prägung in anderen Räumen erfahren haben, herantransportiert.

Ausgleichsraum: Grüengeprägte, relativ unbelastete Freifläche, die an einen → *Wirkungsraum* angrenzt oder mit diesem über → *Kaltluftleitbahnen* bzw. Strukturen mit geringer Rauigkeit verbunden ist. Durch die Bildung kühlerer und frischerer Luft sowie über funktionsfähige Austauschbeziehungen trägt dieser zur Verminderung oder zum Abbau der Belastungen im Wirkungsraum bei. Mit seinen günstigen klimatischen und lufthygienischen Eigenschaften bietet er eine besondere Aufenthaltsqualität für Menschen.

Austauscharme Wetterlage: → *Autochthone Wetterlage*

Autochthone Wetterlage: Durch lokale und regionale Einflüsse bestimmte Wetterlage mit schwacher Windströmung und ungehinderten Ein- und Ausstrahlungsbedingungen, die durch ausgeprägte Tagesgänge der Lufttemperatur, der Luftfeuchte und der Strahlung gekennzeichnet ist. Bei autochthoner Wetterlage sind lokale Klimate wie das Stadtklima oder lokale Windsysteme wie Berg- und Talwinde am ausgeprägtesten.

Autochthones Windfeld: Strömungen, deren Antrieb im Betrachtungsgebiet selber liegt und die nicht durch grossräumige Luftdruckgegensätze beeinflusst werden, z.B. → *Kaltluftabflüsse* und → *Flurwinde*, die sich als eigenbürtige, landschaftsgesteuerte Luftaustauschprozesse während einer windschwachen sommerlichen → *autochthonen Wetterlage* ausbilden.

Basisgeometrien: Diese vom Auftraggeber erarbeitete und bereitgestellte Information beschreibt die Flächennutzung im Kantonsgebiet und stellt eine wichtige Grundlage sowohl für den Aufbau der Geodatenbasis als auch die Planungskarten dar. Die klimatische Situation innerhalb der hier ausgewiesenen Siedlungs- und Grünflächen wird in den Planungshinweiskarten bewertet, so dass die Basisgeometrie als ein zentrales Element der Kartographie angesehen werden kann. Es liegt ein Datensatz für das Basisszenario (Bebauung Stand 2020) sowie das Zukunftsszenario 2060 mit perspektivischer baulicher Flächenentwicklung vor.

Bioklima: Beschreibt die direkten und indirekten Einflüsse von Wetter, Witterung und Klima (= atmosphärische Umgebungsbedingungen) auf die lebenden Organismen in den verschiedenen Landschaftsteilen, insbesondere auf den Menschen (Humanbioklima).

Flurwind: Thermisch bedingte, relativ schwache Ausgleichsströmung, die durch horizontale Temperatur- und Druckunterschiede zwischen vegetationsgeprägten Freiflächen im Umland und (dicht) bebauten Gebieten entsteht. Flurwinde strömen vor allem in den Abend- und Nachtstunden schubweise in Richtung der Überwärmungsbereiche (meist Innenstadt oder Stadtteilzentrum).

Grünfläche: Als „Grünfläche“ werden in dieser Arbeit unabhängig von ihrer jeweiligen Nutzung diejenigen Flächen bezeichnet, die sich durch einen geringen Versiegelungsgrad von maximal ca. 25 % auszeichnen. Neben Parkanlagen, Kleingärten, Friedhöfen und Sportanlagen umfasst dieser Begriff damit auch landwirtschaftliche Nutzflächen sowie Wälder.

Kaltluft: Luftmasse, die im Vergleich zu ihrer Umgebung bzw. zur Obergrenze der entsprechenden Bodeninversion eine geringere Temperatur aufweist und sich als Ergebnis des nächtlichen Abkühlungsprozesses der bodennahen Atmosphäre ergibt. Der ausstrahlungsbedingte Abkühlungsprozess der bodennahen Luft ist umso stärker, je geringer die Wärmekapazität des Untergrundes ist, und über Wiesen, Acker- und Brachflächen am höchsten. Konkrete Festlegungen über die Mindesttemperaturdifferenz zwischen Kaltluft und Umgebung oder etwa die Mindestgrösse des Kaltluftvolumens, die das Phänomen quantitativ charakterisieren, gibt es bisher nicht (VDI 2003).

Kaltluftabfluss: Flächenhaft über unbebauten Hangbereichen auftretende Kaltluftabflüsse. Aufgrund der vergleichsweise höheren Dichte von Kaltluft setzt diese sich, dem Gefälle folgend, hangabwärts in Bewegung. Der Abfluss erfolgt schubweise. Er setzt bereits vor Sonnenuntergang ein und kann die ganze Nacht andauern.

Kaltlufteinwirkungsbereich: Wirkungsbereich der lokal entstehenden Strömungssysteme innerhalb des bebauten Siedlungsraumes (Siedlungsflächen innerhalb des Kantonsgebietes, die von einem klimatisch wirksamen → *Kaltluftvolumenstrom* $> 5 \text{ m}^3/\text{s}$ durchflossen werden sowie eine bodennahe Windgeschwindigkeit von mindestens $0,2 \text{ m/s}$ aufweisen; Mittelwert des Kaltluftvolumenstroms über alle Flächen im Kantonsgebiet).



Kaltluftentstehungsgebiete: Grünflächen mit einem überdurchschnittlichen → *Kaltluftvolumenstrom*, die → *Kaltluftleitbahnen* speisen bzw. über diese hinaus mit → *Kaltluftabflüssen* bis in das Siedlungsgebiet reichen.

Kaltluftleitbahnen: Kaltluftleitbahnen verbinden → *Kaltluftentstehungsgebiete* (→ *Ausgleichsräume*) und Belastungsbereiche (→ *Wirkungsräume*) miteinander und sind somit elementarer Bestandteil des Luftaustausches. Beinhalten thermisch induzierte Ausgleichströmungen sowie reliefbedingte → *Kaltluftabflüsse*.

Kaltluftvolumenstrom: Der Kaltluftvolumenstrom repräsentiert die Kaltluftvolumenstromdichte als Produkt der Fließgeschwindigkeit der → *Kaltluft*, ihrer vertikalen Ausdehnung (Schichthöhe) und der horizontalen Ausdehnung des durchflossenen Querschnitts einer 5 m Rasterzelle (Durchflussbreite). Der Kaltluftvolumenstrom beschreibt somit diejenige Menge an → *Kaltluft* in der Einheit m^3/s , die in jeder Sekunde durch den Querschnitt einer 5 m x 5 m Rasterzelle fließt. Anders als das → *Strömungsfeld* berücksichtigt der Kaltluftvolumenstrom somit auch Fließbewegungen oberhalb der bodennahen Schicht (vgl. Abb. 4.7 in Kap. 4.4).

Kelvin (K): SI-Basiseinheit der thermodynamischen Temperatur, die zur Angabe von Temperaturdifferenzen verwendet wird. Der Wert kann in der Praxis als Abweichung in Grad Celsius ($^{\circ}\text{C}$) interpretiert werden.

Klimaanalysekarte: Die Klimaanalysekarte fasst verschiedene Informationsebenen zur klimatischen Situation in den Nachtstunden zusammen. Neben den Parametern zum Luftaustausch wie → *autochthones Windfeld* und → *Kaltluftvolumenstrom* beschreibt die Abweichung der Lufttemperatur vom Mittelwert der Grün- und Freiflächen die Ausprägung der → *städtischen Wärmeinsel* innerhalb der Siedlungsflächen.

PET (Physiologisch äquivalente Temperatur): Humanbioklimatischer Index zur Kennzeichnung der Wärmebelastung des Menschen, der Aussagen zur Lufttemperatur, Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit sowie kurz- und langwelligen Strahlungsflüssen kombiniert und aus einem Wärmehaushaltsmodell abgeleitet wird.

Planungshinweiskarte: Bewertung der bioklimatischen Belastung im bebauten Siedlungsraum sowie an Strassen und Plätzen im Kantonsgebiet (→ *Wirkungsräume*) sowie der Bedeutung von Grünflächen als → *Ausgleichsräume* für die Tag- und die Nachtsituation und Ableitung von allgemeinen Planungshinweisen.

RCP-Szenario: Die RCP-Szenarien (Representative Concentration Pathways bzw. repräsentativer Konzentrationspfad) beschreiben unterschiedliche Verläufe der Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre. Diese werden seit dem fünften IPCC-Bericht des Weltklimarates verwendet. Abhängig vom weiterem Ausstoß von klimawirksamen Gasen werden vier Szenarien mit unterschiedlich starken Konzentrationen von Treibhausgasen ausgewiesen.

Städtische Wärmeinsel (Urban Heat Island): Städte weisen im Vergleich zum weitgehend natürlichen, unbebauten Umland aufgrund des anthropogenen Einflusses (u.a. hoher Versiegelungs- und geringer Vegetationsgrad, Beeinträchtigung der Strömung durch höhere Rauigkeit, Emissionen durch Verkehr, Industrie und Haushalt) ein modifiziertes Klima auf, das im Sommer zu höheren Temperaturen und bioklimatischen Belastungen führt. Das Phänomen der Überwärmung kommt vor allem nachts zum Tragen und wird als Städtische Wärmeinsel bezeichnet.

Strömungsfeld: Für den Analysezeitpunkt 04:00 Uhr morgens simulierte flächendeckende Angabe zur Geschwindigkeit und Richtung der → *Flurwinde* sowie → *Kaltluftabflüsse* und → *Kaltluftleitbahnen* in 2 m über Grund während einer → *autochthonen Wetterlage*.

Strukturwind: Kleinräumiges Strömungsphänomen, das sich zwischen strukturellen Elementen einer Stadt ausbildet (bspw. zwischen einer innerstädtischen → *Grünfläche* und der Bebauung entlang einer angrenzenden Strasse).

Wirkungsraum: Bebauter oder zur Bebauung vorgesehener Raum (Siedlungs- und Gewerbeflächen), in dem eine bioklimatische oder lufthygienische Belastung auftreten kann.

z-Transformation: Umrechnung zur Standardisierung einer Variablen, sodass der arithmetische Mittelwert der transformierten Variable den Wert Null und ihre Standardabweichung den Wert Eins annimmt. Dies wird erreicht, indem von jedem Ausgangswert der Variablen das arithmetische Gebietsmittel abgezogen und anschliessend durch die Standardabweichung aller Werte geteilt wird. Dadurch nehmen Abweichungen unterhalb des Gebietsmittels negative und Abweichungen oberhalb des Gebietsmittels positive Werte an, die in Vielfachen der Standardabweichung vorliegen. Die Form der Verteilung bleibt dabei unverändert.



Zusammenfassung

Im Auftrag des Stadtplanungsamts der Stadt Bern wurde vom Büro GEO-NET Umweltconsulting GmbH eine modellgestützte Analyse zu den klimaökologischen Funktionen für das Stadtgebiet von Bern sowie für Teile der stadtnahen Agglomerationsräume¹ erstellt. Ziel war es, meteorologische Basisdaten in einer hohen räumlichen Auflösung zu simulieren (5 m x 5 m Raster) und die siedlungsklimatischen Zusammenhänge und Prozesse herauszuarbeiten – insbesondere die Kaltluftentstehungsgebiete einschliesslich des Kaltluftvolumenstroms in Grün- und Freiflächen sowie die Siedlungsflächen mit einem Wärmeinseleffekt. Zudem wird auch die Aufenthaltsqualität an Sommertagen mit starker solarer Einstrahlung bewertet. Zentraler Baustein dieses Verfahrens war das Klimamodell FITNAH (Flow over Irregular Terrain with Natural and Anthropogenic Heat Sources). Diese Herangehensweise beinhaltet folgende wichtige Vorteile:

- Die Vergleichbarkeit der Ergebnisse im Gesamttraum wird gewährleistet
- Klimaökologische Ausgleichs- und Prozessräume werden im Stadtgebiet verortet und in ihrer (möglichst exakten) räumlichen Ausprägung dargestellt.
- Ein wichtiger Aspekt des klimaökologischen Ausgleichspotenziales von Freiflächen - der Kaltlufthaushalt - kann nur auf diese Weise flächendeckend untersucht werden. Zudem können auch quantitative Aussagen z.B. zu den abfliessenden Kaltluftvolumina getroffen werden

Im Gegensatz zu punkthaften Messungen liegen mit dem modellgestützten Ansatz flächendeckende Daten zum Kaltlufthaushalt für das gesamte Stadtgebiet vor. Die Nachtsituation ist dahingehend von Relevanz, da nur dann eine im Vergleich zu Siedlungsflächen intensivere Abkühlung auf Freiflächen mit Vegetation erfolgt. Dabei entstehen je nach Größe unterschiedliche Mengen an Kaltluft, welche als lokale Strömungssysteme Kalt-/Frischlufte für den Siedlungsbereich liefern und dort die Wärmebelastung während sommerlicher Hitzeperioden abmildern können. Dargestellt wird eine windschwache, austauscharme sommerliche Wettersituation für die Monate Juli / August. Diese Wetterlage ist das sogenannte Worst-Case-Szenario, das wegen seiner belastenden Wirkung auf die Gesundheit des Menschen unter besonderer Beachtung von Älteren, Kranken und Kindern zur Beurteilung der bioklimatischen Situation gemäss VDI-Richtlinie 3785 Blatt 1 herangezogen wird.

Betrachtete Wettersituation und nächtlicher Luftaustausch

Besondere Bedeutung haben im siedlungsklimatischen Zusammenhang die windschwachen autochthonen Luftaustauschprozesse (vgl. Glossar). Verglichen mit einer „mittleren“ sommerlichen Wettersituation gehen die austauscharmen sommerlichen Hochdruckwetterlagen häufig mit höheren Lufttemperaturen und einer überdurchschnittlich hohen Wärmebelastung in den Siedlungsräumen einher („Worst-Case“-Szenario). Unter diesen meteorologischen Rahmenbedingungen ohne nennenswerte übergeordnete Windströmung können nächtliche Kalt- und/oder Frischluftströmungen aus dem Umland und innerstädtischen Grünflächen zum Abbau der Belastungen beitragen. Der „Antrieb“ für diesen Luftaustausch ist der Temperaturunterschied zwischen warmen Siedlungsflächen und kühleren Grün- und Freiflächen.

¹ Im Folgenden wird vereinfacht vom Stadtgebiet gesprochen.



In bebautem Gelände üben die einzelnen Gebäude eine Hinderniswirkung auf nächtliche Kaltluftströmungen aus und verzögern diese. Als Kaltluft produzierende Bereiche werden vegetationsgeprägte Freiflächen identifiziert, wie z.B. Ackerflächen und Parkareale, aber auch Grünflächen wie Kleingärten und Friedhofsanlagen.

Die Kaltluftströmungen tragen direkt zur Frisch-/Kaltluftversorgung der angrenzenden Siedlungsflächen bei. Zum Zeitpunkt 04 Uhr morgens befinden sich ca. 25 % der Siedlungsfläche im Einwirkungsbereich. Es zeigt sich, dass eine gering überbaute Einzel- und Reihenhausbauung besser durchströmt wird als eine Block- und Blockrandbebauung wie der verdichtete Innenstadtbereich von Bern. Überdurchschnittlich hohe Kaltluftvolumina entstehen vor allem durch Kaltluftabflüsse über Hangbereichen, welche über hunderte von Metern in die Bebauung einwirken können.

Kleinere Grünareale können als „grüne Trittsteine“ das Eindringen von Kaltluft in die Bebauung unterstützen und damit den klimatischen Einwirkungsbereich vergrößern. Eine hohe Bedeutung kommt aber auch den kleineren Park-, Ruderal- und Brachflächen oder gering versiegelten Sportplätzen zu, sofern sie Entlastungswirkungen für die benachbarte Bebauung erzeugen können. Zudem können diese an Tagen mit starker Wärmebelastung durch Verschattung und Verdunstungskühle auch (kleinräumig) klimatisch günstige Aufenthaltsbereiche darstellen.

Teile der überbauten Flächen wie bspw. auch die Innenstadtbereiche der kleineren Städte weisen während austauscharmer sommerlicher Hochdruckwetterlagen einen Mangel an Durchlüftung auf. Sie werden nicht nennenswert von Kaltluft durchströmt, da die hohe Bebauungsdichte und das im Vergleich zum Freiland höhere Temperaturniveau die Kaltluftströmung abschwächen. Eine erhebliche Wärmebelastung am Tage ist über den stark versiegelten Strassen und Plätzen, Gleisanlagen sowie Gewerbeflächen anzutreffen.

Zukunftsszenario

Neben der gegenwärtigen Situation, deren Flächenkulisse den Stand 2020 sowie zu erwartende Überbauungsplanungen der kommenden fünf Jahren abbildet, wird auch ein Zukunftsszenario simuliert. Dieses beinhaltet städtebauliche Entwicklungsflächen, welche in absehbarer Zeit realisiert werden. Diesem Zukunftsszenario werden die mit dem Klimawandel zu erwartenden Einflüsse zugrunde gelegt, aufgrund derer die Temperatur für den „Antrieb“ der Modellrechnung um +2,6 K erhöht wird. Das entspricht der Änderungen der sommerlichen Mitteltemperatur gegenüber der Referenzperiode 1981 bis 2010 für das Bezugsjahr 2060. Dies ermöglicht, die Daten der globalen bzw. Schweizer Klimaszenarien auf die räumlich hoch aufgelöste Flächenkulisse der FITNAH-Simulation aufzuprägen. Dabei zeigt sich, welche Stadtstrukturen eher abschwächend oder verstärkend auf die zukünftig ansteigende Wärmebelastung wirken werden. Letzteres betrifft vor allem die innerstädtischen Siedlungsflächen sowie die gewerblich genutzten Areale. Aber auch zahlreiche Siedlungsflächen mit derzeitiger moderater Überwärmung können bis 2060 in eine Belastungssituation eingeordnet werden. Im Allgemeinen werden sowohl die Grünflächen als auch der Siedlungsraum wärmer. Die Grünflächen liefern aber auch zukünftig kalte Luft. Allerdings ist diese - unter dem Einfluss des Klimawandels - etwas wärmer verglichen mit der Gegenwart, aber immer noch kühler als die Siedlungsräume. Die relativen Temperaturunterschiede zwischen den Landnutzungen sowie der Luftaustausch insgesamt bleiben ähnlich ausgeprägt.



Die fünf simulierten Parameter

Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET),
bodennahe Lufttemperatur,
Kaltluftproduktionsrate,
bodennahes Kaltluftströmungsfeld sowie der
Kaltluftvolumenstrom

stellen die Grundlage für die Herleitung der Klimaanalyse- und Planungshinweiskarten dar.

Analyse- und Bewertungskarten

Die Klimaanalysekarte beschreibt die wesentlichen siedlungsklimatischen Prozesse für die Nachtsituation. An dieser Stelle findet aber noch keine Bewertung statt. Es werden vielmehr zum einen die absolute Überwärmung von Siedlungsflächen und zum anderen die Quantitäten an Kaltluft dargestellt, die über den Grünräumen entstehen und in der Bebauung klimatisch ausgleichend einwirken. Neben den regionalen und lokal bedeutsamen Luftaustauschbeziehungen werden über die Kaltlufteinzugsgebiete auch die Prozessräume der Kaltluftströmungen abgegrenzt. Da am Tage diese Prozesse nicht auftreten, wird in der Klimaanalysekarte nur die Nachtsituation betrachtet. In der Nachtsituation stehen die Wärmebelastung der Siedlungsflächen sowie die Versorgung mit klimatisch ausgleichenden Kaltluftströmungen im Vordergrund. Diese werden in der Teilkarte „Kaltluftsystem“ ausgewiesen und je nach Prozesstyp differenziert dargestellt. Sofern die Luftaustauschprozesse stark genug ausgeprägt sind, können vor allem linear ausgerichtete, gering überbaute Freiflächen (Luftleitbahnen) die Kaltluftentstehungsflächen und Siedlungsräume miteinander verbinden. Darüber hinaus treten im Stadtgebiet auch flächendeckende Hangabwinde auf.

Die Planungshinweiskarte für die Tagsituation gibt die Bewertung der Aufenthaltsqualität in den Grün- und Siedlungsflächen wieder. Diese wird vor allem über die Sonneneinstrahlung beeinflusst, so dass in Bereichen mit hohem Baumanteil meist auch eine günstige Situation für den Aufenthalt im Freien vorliegt.



1. Aufgabenstellung

Die Schutzgüter Klima bzw. Luft sind wichtige Aspekte der räumlichen Planung und Bestandteile der Abwägung in der Nutzungsplanung, Umweltverträglichkeitsprüfung und bei Massnahmen in der Bestandsbebauung. Vor dem Hintergrund konkurrierender Planungsziele sind flächenbezogene Fachinformationen ein wichtiges Hilfsmittel zur sachgerechten Beurteilung dieser Schutzgüter. Aus der Kenntnis des in einer Stadt vorherrschenden Lokalklimas sowie der dadurch mitbestimmten lufthygienischen Situation und den klimatischen Funktionszusammenhängen lassen sich Schutz- und Entwicklungsmassnahmen zur Verbesserung von Klima und Luft ableiten. Dieser Leitgedanke gilt der Sicherung, Entwicklung und Wiederherstellung klima- und immissionsökologisch wichtiger Oberflächenstrukturen und zielt auf die Erhaltung und Verbesserung günstiger bioklimatischer Verhältnisse und die Unterstützung gesundheitlich unbedenklicher Luftqualität ab.

Im Auftrag des Stadtplanungsamts der Stadt Bern wurde vom Büro GEO-NET Umweltconsulting GmbH in Kooperation mit Prof. Dr. G. Gross (Universität Hannover, Deutschland) im Zeitraum 2020 bis 2022 eine modellgestützte Analyse zu den klimaökologischen Funktionen für das Stadtgebiet von Bern durchgeführt. Im Vordergrund standen dabei austauscharme sommerliche Hochdruckwetterlagen (auch autochthone Wetterlagen genannt), die häufig mit einer überdurchschnittlich hohen Wärmebelastung in den Siedlungsräumen einhergehen. Technisch ermöglichen nur solche Wetterlagen eine Analyse der lokalklimatischen Situation, da in diesem Fall übergeordnete Wetterphänomene die zu analysierenden lokalen Phänomene aufgrund von grossräumigen Luftdruckdifferenzen nicht überlagern. Unter diesen meteorologischen Rahmenbedingungen können nächtliche Kalt- und Frischluftströmungen aus dem Umland und innerstädtischen Grünflächen zum Abbau der Belastungen beitragen (Abb. 1.1).

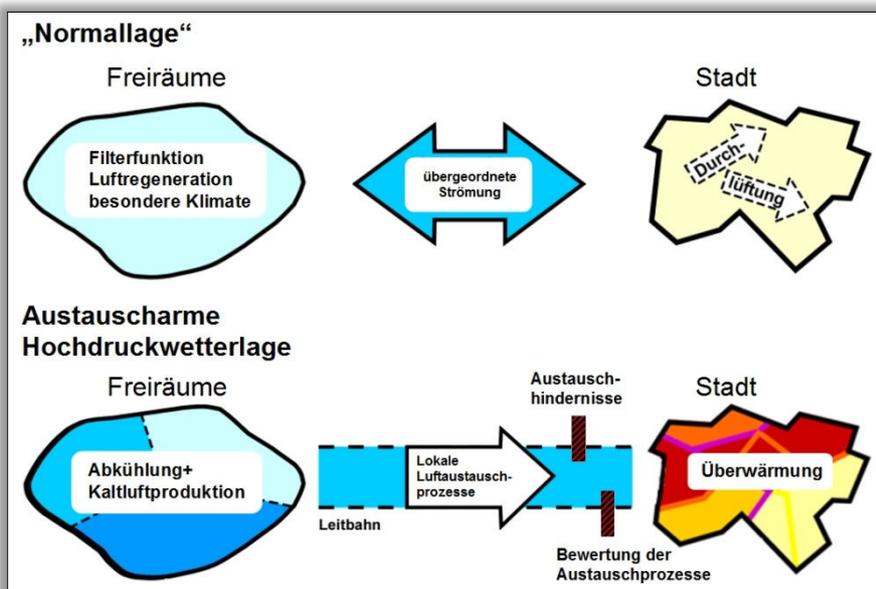


Abb. 1.1: Prozessorientierte Analyse

Zwischen klimatisch wirksamen Grün-/Freiflächen einerseits und städtisch verdichteten Bereichen andererseits sowie verbindender Strukturen ergibt sich ein komplexes Bild vom Prozesssystem der Luftaustauschströmungen im Stadtgebiet Bern.



Wesentliches Ziel der Analyse ist, mit der Anwendung des Klimamodells FITNAH (Flow over Irregular Terrain with Natural and Anthropogenic Heat Sources; vgl. Glossar) und den aus der Klimaanalyse gewonnenen Ergebnissen eine umfassende Bestandsaufnahme der klimatischen Situation in der Stadt Bern durchzuführen. Weiterhin besteht das Ziel, klimaökologisch wichtige und bioklimatisch belastete Raumstrukturen herauszuarbeiten und darzustellen. Im Gegensatz zu punkthaften Messungen liegen mit dem modellgestützten Ansatz flächendeckende Daten zum Kaltlufthaushalt für das gesamte Stadtgebiet vor. Diese erlauben eine optimierte Darstellung der thermischen Belastung und insbesondere des Kaltluftprozessgeschehens in der Nacht. Die Ergebnisse spiegeln neben der Nacht-Situation auch die bioklimatische Belastung am Tage wider. Darüber hinaus wird für die Tagsituation eine Bewertung der bioklimatischen Belastung in den Siedlungsräumen bzw. der Bedeutung von Grünflächen als Ausgleichsräume vorgenommen und daraus eine allgemeine Planungshinweise abgeleitet.

Der vorliegende Bericht stellt die siedlungsklimatische Analyse dar, geht auf die Methodik der Modellrechnung sowie die Analyse- und Planungshinweiskarten ein und schliesst mit der Untersuchung der Auswirkungen des Klimawandels auf das Klima in der Stadt Bern ab.



2 Datengrundlage und Aufbau der Geodatenbasis für die Modellrechnungen

Bei einem numerischen Modell wie FITNAH 3D werden zur Festlegung und Bearbeitung der Aufgabenstellung eine Reihe von Eingangsdaten benötigt, die charakteristisch für die Landschaft des Untersuchungsgebiets sind und die grösserskaligen meteorologischen Rahmenbedingungen wie Wetterlage oder Klimaszenario definieren. Das Untersuchungsgebiet für das Stadtgebiet Bern wird als rechteckiges Rechengebiet aufgespannt und hat eine Abmessung von 9.725 m x 17.285 m. Für jede Rasterzelle müssen jeweils als repräsentativer Wert folgende Daten vorliegen:

- Geländehöhe (z.B. Geländehöhe, Neigung, Orientierung)
- Nutzungsstruktur (Verteilung der Landnutzung, Bodenbedeckung)
- Strukturhöhe (Gebäude- und Vegetationshöhen)
- Versiegelungsgrad.

Die Tabelle 2.1 gibt einen Überblick über die Nutzungsstruktur mit dem jeweiligen Versiegelungsgrad und der Höhe. Für die Gebäude und Vegetationsklassen werden die Höhenangaben aus den vorhandenen Datensätzen übertragen.

Tab. 2.1: Nutzungskategorien der Klimamodellierung

Nummer der Nutzungskategorie	Beschreibung	Versiegelungsgrad [%]	Strukturhöhe [m]
1	einzelne, freistehende Gebäude	100	individuell
2	unbebaut versiegelt (Strassen)	95	0
3	Gewässer	0	0
4	Gleis	25	0,5
5	Rasen plus niedrige Vegetation	5	individuell
6	Rebflächen	5	2
7	versiegelt plus hohe Vegetation	90	individuell
8	hohe Vegetation über Rasen = grössere zusammenhängende Waldflächen	0	individuell
9	freiliegender Fels	95	0
10	Geröll, Sand, naturferner Boden ohne Vegetation	0	0

Da das Stadtgebiet Bern in einer 5 m Auflösung, also mikroskalig simuliert wurde, sind Gebäude sowohl in Bezug auf ihren Grundriss (aus der Bodenbedeckung) als auch ihrer Höhe erfasst, sodass deren Effekte auf das Mikroklima und insb. das Strömungsfeld berücksichtigt werden. Die räumliche Auflösung ermöglichte eine detaillierte Erfassung von Grünstrukturen, allerdings konnten einzelne (insb. kleinkronige) Bäume auf dieser Massstabebene noch nicht separat ausgewiesen werden.

Die Nutzungsklassen wurden über Look-Up Tabellen, die auf die Kategorien der Bodenbedeckung zugegriffen haben, in die Eingangsdaten für FITNAH übertragen. Die Versiegelungsgrade wurden ebenfalls für die



Nutzungsklassen per Look-Up-Tabellen übertragen (siehe Tabelle 2.1). Die Gesamtheit der in Tabelle 2.2 zusammengefassten Daten repräsentiert das Jahr 2020.

Tab. 2.2: Übersicht über die unterschiedlichen Datenquellen mit Jahr und Quelle.

Informationsebene	Quelle	Datenstand
Gebäude	Gebäude aus Landschaftsmodell (Quelle: Stadt Bern, GSB) http://gisbern.bgov.ch/geodatenkatalog/index.html?swissbuil_dings3d2_0.htm	Datenbezug im März 2021
Digitales Geländehöhenmodell (DGM)	Digitales Geländehöhenmodell; bereitgestellt durch die Stadt Bern	2020
Landnutzung/ Bodenbedeckung	MoPuBe	2020
Vegetation	LIDAR-basiertes Vegetationsmodell; bereitgestellt durch die Stadt Bern	2020

Flächenkulisse Zukunftsszenario

Um die Nutzungsstrukturen möglichst aktuell abzubilden, werden alle städtebaulichen Entwicklungsflächen, deren Realisierung in den nächsten 4 bis 5 Jahre absehbar ist, in die Flächenkulisse für die Gegenwart eingebunden. Für das Zukunftsszenario werden die perspektivisch absehbaren Siedlungserweiterungen berücksichtigt, wobei hier zwischen den Nutzungsarten Arbeiten und Wohnen unterschieden wird. Im Stadtgebiet Bern wurden zahlreiche Entwicklungsflächen berücksichtigt. Dabei wurden bei bereits konkreten städtebaulichen Entwürfen die Gebäude übernommen. In den Flächen, wo dies nicht der Fall war (z.B. beim Gaswerkareal), kam der sogenannte „Mischpixel-Ansatz“ zum Einsatz. Dabei wird eine statistisch signifikante Menge von Rasterpixeln ähnlicher siedlungstypologischer Ausprägung ausgewählt, um die jeweilige Entwicklungsfläche möglichst repräsentativ in das Quartiersbild einzubetten. Für die zukünftig zu entwickelnden Gebiete werden Flächen aus der Ist-Situation ausgewählt, die dem Bebauungszustand der Zukunft entsprechen. Auf der Grundlage der FITNAH-Eingangsdaten erfolgt eine Auswertung hinsichtlich der repräsentativen Verteilung der Oberflächenbedeckung. Somit lassen sich die Entwicklungsflächen in das Modellumfeld übertragen, ohne dafür eine konkrete Konstruktion auf der jeweiligen Fläche erzeugen zu müssen.

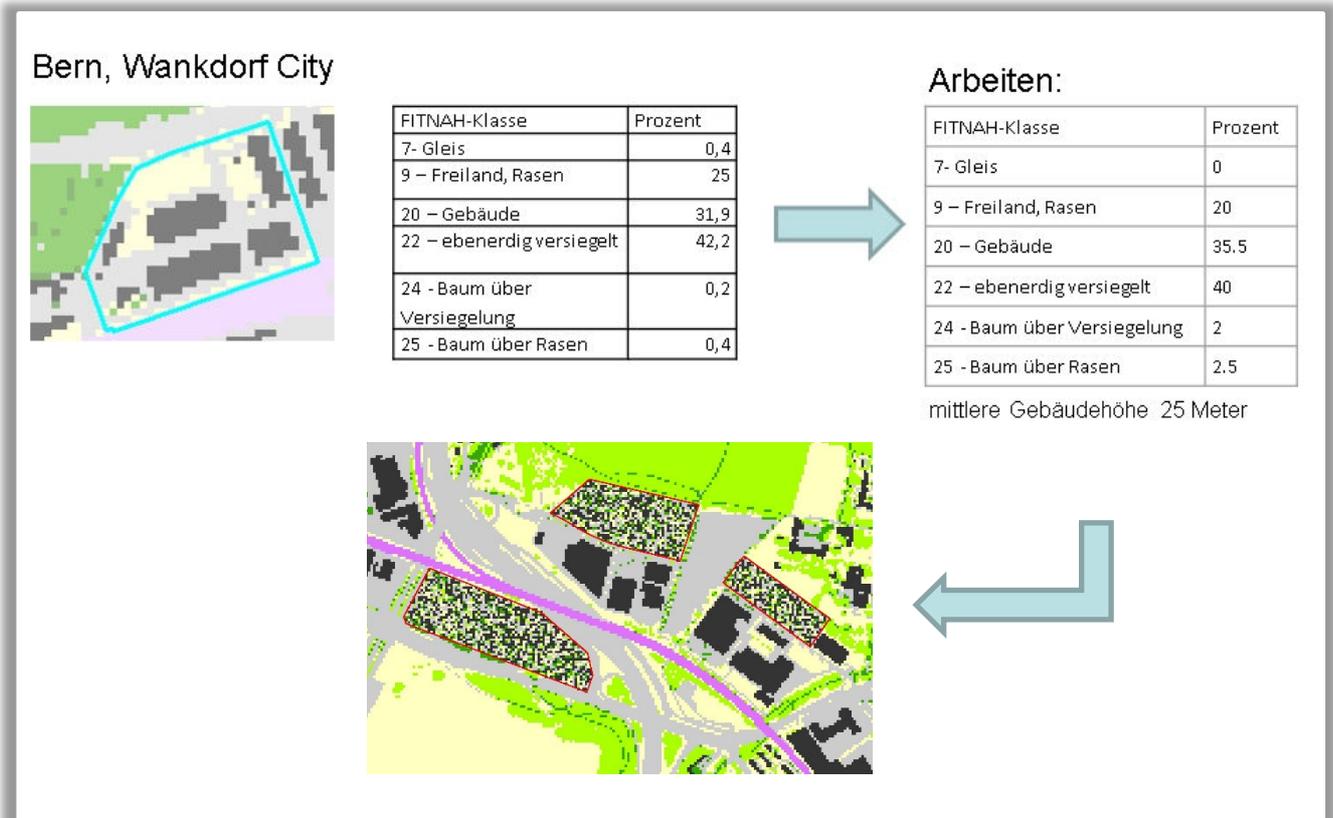


Abb. 2.1: Exemplarische Referenzflächen für die Siedlungstypologie „Arbeiten/Mischnutzung“ am Beispiel Bern Wankdorf sowie abgeleitete Mischpixelfläche „Arbeiten“ am Beispiel Schermerareal sowie Nachnutzung Areal Schermenweg

In den Ergebniskarten weisen diese Areale ein enges Nebeneinander von Rasterzellen mit Gebäuden und Aussenraum auf. Sie haben daher ein anderes Erscheinungsbild als benachbarte Bereiche, welche durch bebaute (Grau) und unbebaute Flächenanteile (Gelb/Orange) klarer untergliedert sind. Abbildung 2.2 zeigt einen Ausschnitt aus der Klimaanalysekarte mit dem Gaswerk-Areal (blau abgegrenzt), wo der nächtliche



Abb. 2.2: Rasterdarstellung in Mischpixelflächen am Beispiel Gaswerk

Wärmeineleffekt für den nicht mit Gebäude bestandem Aussenraum eher lückig und mosaikhaft dargestellt wird.

Für die Bewertung der Fläche in der Planungshinweiskarte Tag ist dies jedoch nicht von Nachteil. Hier wird, wie in den übrigen Flächen auch, ein Mittelwert herangezogen, für dessen Berechnung die räumliche Verteilung der Rasterzellen innerhalb einer Siedlungsfläche unwesentlich ist. Entscheidend ist also vielmehr eine der Nutzung angemessene Verteilung von Gebäuden sowie den versiegelten und nicht versiegelten Oberflächen.



2.1 Eingangsdaten

Die Abgrenzung des Simulationsraumes geht deutlich über das Gebiet der Stadt Bern hinaus und zielt darauf ab, auch ausserhalb des Stadtgebietes vorhandene Strukturen wie Wald- und Ackerflächen in die Klimamodellierung zu integrieren und die relevanten Höhenzüge zu erfassen. Somit ist gewährleistet, dass alle für den Kaltlufthaushalt relevanten Struktureinheiten - insbesondere des Reliefs - berücksichtigt werden. Die für die FITNAH-Modellierung vorgesehene Rasterzellenauflösung beträgt 5 m. Zur Bereitstellung der orographischen Eingangsparameter für die Klimaanalyse konnte auf ein digitales Geländehöhenmodell (DTM aus dem Jahr 2020) mit einer Auflösung von 25 cm zurückgegriffen werden, welches das gesamte Stadtgebiet repräsentiert (Abb. 2.3).

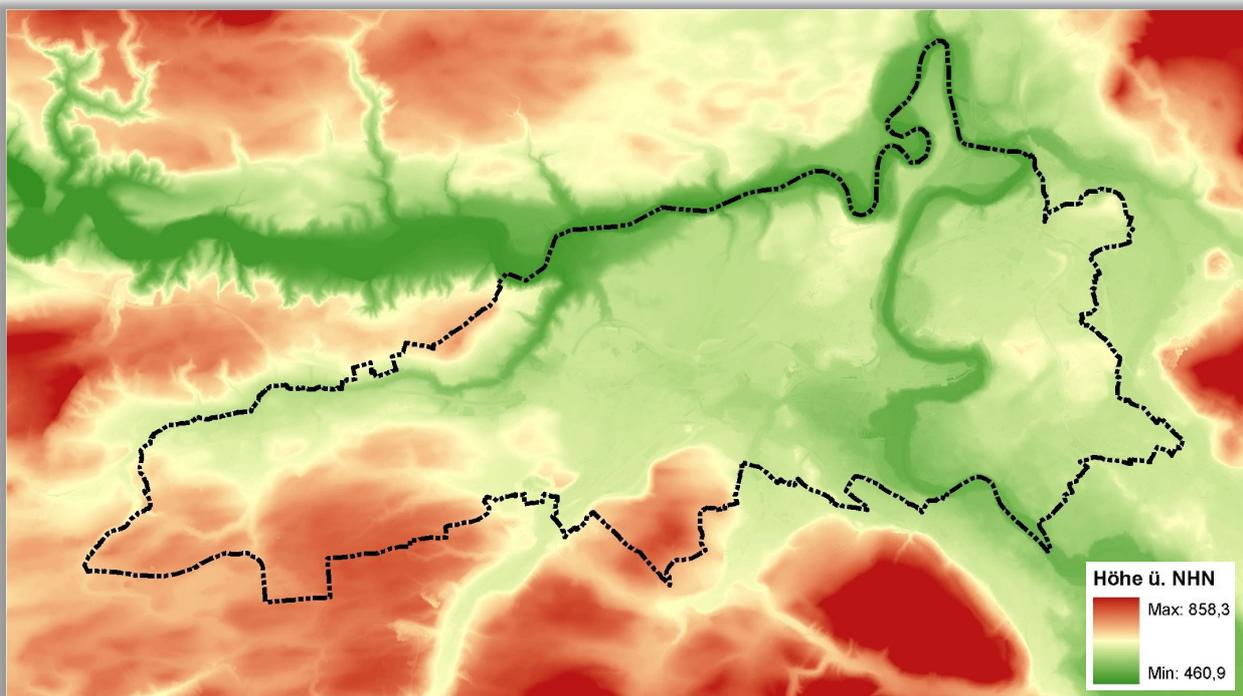


Abb. 2.3: Geländehöhe im Modellierungsgebiet

Für die Aufbereitung der Nutzungsstrukturen wurden im Wesentlichen Daten aus der Informationsebene Bodenbedeckung (Amtliche Vermessung; Datenstand Mai 2020) verwendet sowie weitere zur Verfügung gestellte Eingangsdaten, die bspw. die noch nicht enthaltenen Gebäude in der Bodenbedeckung beinhalteten. Um den speziellen Anforderungen der Modellanalyse gerecht werden zu können, wurde bei der Aufbereitung der Nutzungsstrukturen ein 11-klassiger Nutzungsschlüssel verwendet (siehe Tabelle 2.1). Der Schlüssel wurde vor allem auch dahingehend definiert, eine problemlose Zuweisung des mittleren Versiegelungsgrades auf Basis der in den Eingangs- und Literaturdaten vorkommenden Nutzungsklassifizierungen zu ermöglichen (Mosimann et al. 1999). Die Abbildung 2.4 zeigt die rasterbasierten Eingangsdaten für das Modellgebiet der FITNAH-Modellrechnung mit einer Auflösung von 5 m x 5 m. Das Modellgebiet erstreckt sich über das Stadtgebiet Bern hinaus bis in die Nachbargemeinden.

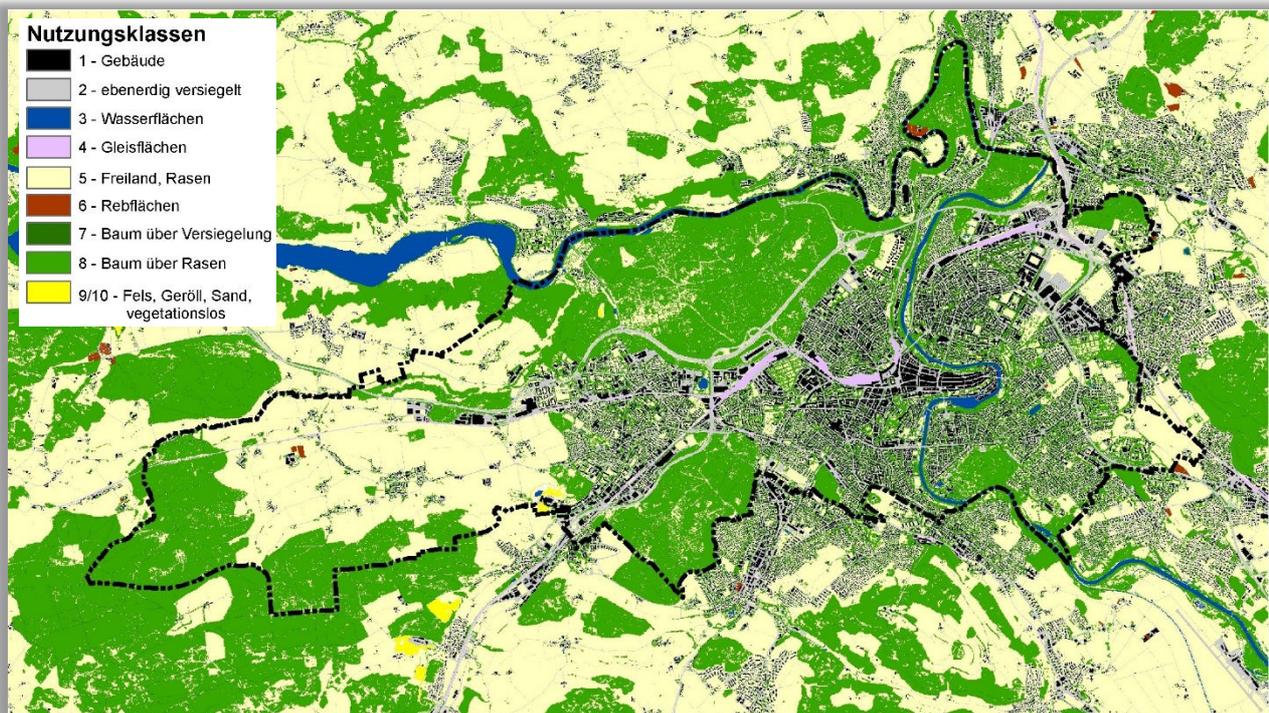


Abb. 2.4: Nutzungsstruktur im Stadtgebiet

Ein wichtiger Modelleingangsparameter stellt darüber hinaus die Höhe der Baustrukturen und der Vegetation dar, welche einen wesentlichen Einfluss auf das lokale Windfeld ausüben, weil sie als Hindernisse wirken. Da bei der 5 x 5 m-Massstabsebene Einzelgebäude und Baumgruppen aufgelöst werden können, sind die realen Gebäude- und Vegetationshöhen auf das Rechenraster übertragen worden.

Weiteren massgeblichen Einfluss auf die meteorologischen Parameter üben die Flächeneigenschaften wie der Versiegelungsgrad aus. Dieser wird, wie in Tabelle 2.1 dargestellt, den jeweiligen Nutzungsklassen angehängt. Diese Werte beruhen auf Analyse und Auswertung von Versiegelungsgraden deutscher Städte. Aus der Verknüpfung der unterschiedlichen Quellen ist somit eine aktuelle Informationsebene zur Nutzung, Strukturhöhe und Oberflächenversiegelung aufgebaut worden.



3. Methode der modellgestützten Siedlungsklimaanalyse

3.1 Das Stadtklimamodell FITNAH 3D

Neben globalen Klimamodellen und regionalen Wettervorhersagemodellen wie sie zum Beispiel vom Deutschen Wetterdienst (DWD) oder in der Schweiz von MeteoSchweiz für die tägliche Wettervorhersage routinemässig eingesetzt werden, nehmen kleinräumige Modellanwendungen für umweltmeteorologische Zusammenhänge im Rahmen von stadt- und landschaftsplanerischen Fragestellungen einen immer breiteren Raum ein. Die hierfür eingesetzten mikro- und mesoskaligen Modelle erweitern das Inventar meteorologischer Werkzeuge zur Berechnung atmosphärischer Zustände und Prozesse. Der Grossteil praxisnaher umweltmeteorologischer Fragestellungen behandelt einen Raum von der Grössenordnung einer Stadt bzw. Region. Die bestimmenden Skalen für die hier relevanten meteorologischen Phänomene haben eine räumliche Erstreckung von Metern bis hin zu einigen Kilometern und eine Zeitdauer von Minuten bis Stunden. Unter Verwendung des üblichen Einteilungsschemas meteorologischer Phänomene werden diese in die Meso- und Mikroskala eingeordnet. Beispiele für mesoskalige Phänomene sind Land-See-Winde, Flurwinde oder die Ausbildung einer städtischen Wärmeinsel, wobei der Übergang zur Mikroskala fließend ist (bspw. der Einfluss von Hindernissen auf den Wind wie Kanalisierung, Umströmung bzw. Düseneffekte, aber auch die klimaökologischen Auswirkungen von Begrünungsmassnahmen).

Obwohl die allgemeine Struktur und physikalischen Ursachen dieser lokalklimatischen Phänomene im Wesentlichen bekannt sind, gibt es nach wie vor offene Fragen hinsichtlich der räumlichen Übertragbarkeit auf andere Standorte oder der Sensitivität bezüglich der Wechselwirkungen einzelner Strömungssysteme untereinander. Ein Grund hierfür sind die relativ kleinen und kurzen Skalen dieser Phänomene und deren unterschiedliches Erscheinungsbild in komplexem Gelände. Entsprechend ist es schwierig, aus einer beschränkten Anzahl von Beobachtungen eine umfassende Charakterisierung zu erhalten, jedoch kann dieser Nachteil mit Hilfe ergänzender Modelluntersuchungen überwunden werden.

Beginnend mit einem Schwerpunktprogramm der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG 1988) wurden eine Reihe mesoskaliger Modelle konzipiert und realisiert. Der heutige Entwicklungsstand dieser Modelle ist sehr hoch. Zusammen mit den über die letzten Dekaden gewonnenen Erfahrungen im Umgang mit diesen Modellen sowie mit Messungen vor Ort und Windkanalstudien steht mit dem FITNAH 3D- Modell ein weiteres leistungsfähiges und universell einsetzbares Werkzeug zur Verfügung. Es dient zur Bearbeitung umweltmeteorologischer Fragestellungen in kleinen, stadt- und landschaftsplanerisch relevanten Landschaftsausschnitten.

GRUNDLAGEN MESO- UND MIKROSKALIGER MODELLE

Die Verteilung lokalklimatisch relevanter Grössen wie Wind und Temperatur kann mit Hilfe von Messungen ermittelt werden. Aufgrund der grossen räumlichen und zeitlichen Variation der meteorologischen Felder im Bereich einer komplexen Umgebung sind Messungen allerdings nur punktuell repräsentativ und eine Übertragung in benachbarte Räume selten möglich.



Stadtklimamodelle wie FITNAH 3D können zu entscheidenden Verbesserungen dieser Nachteile herangezogen werden, indem sie physikalisch fundiert die räumlichen und/oder zeitlichen Lücken zwischen den Messungen schliessen, weitere meteorologische Grössen berechnen und Wind- bzw. Temperaturfelder in ihrer raumfüllenden Struktur ermitteln. Die Modellrechnungen bieten darüber hinaus den Vorteil, dass Planungsvarianten und allfällige Kompensationsmassnahmen in ihrer Wirkung und Effizienz studiert und auf diese Art und Weise optimierte Lösungen gefunden werden können.

Für jede meteorologische Variable wird eine physikalisch fundierte mathematische Berechnungsvorschrift aufgestellt. Die Modelle basieren daher, genauso wie Wettervorhersage- und Klimamodelle, auf einem Satz sehr ähnlicher Bilanz- und Erhaltungsgleichungen. Das Grundgerüst besteht aus den Gleichungen für die Impulserhaltung (Navier-Stokes Bewegungsgleichung), der Massenerhaltung (Kontinuitätsgleichung) und der Energieerhaltung (1. Hauptsatz der Thermodynamik). Je nach Problemstellung und gewünschter Anwendung kann dieses Grundgerüst erweitert werden, um z.B. die Effekte von Niederschlag auf die Verteilung siedlungsklimatologisch wichtiger Grössen zu berücksichtigen. In diesem Falle müssen weitere Bilanzgleichungen für Wolkenwasser, Regenwasser und feste Niederschlagspartikel gelöst werden. Die Lösung der Gleichungssysteme erfolgt in einem numerischen Raster. Die Rasterweite muss dabei so fein gewählt werden, dass die lokalklimatischen Besonderheiten des Untersuchungsraumes vom jeweiligen Modell erfasst werden können. Je feiner das Raster gewählt wird, umso mehr Details und Strukturen werden aufgelöst.

Allerdings steigen mit feiner werdender Rasterweite die Anforderungen an Rechenzeit und die benötigten Eingangsdaten. Hier muss ein Kompromiss zwischen Notwendigkeit und Machbarkeit gefunden werden. In der vorliegenden Untersuchung beträgt die für die Modellierung mit FITNAH 3D verwendete horizontale räumliche Maschenweite 5 m. Die vertikale Gitterweite ist dagegen nicht äquidistant und in der bodennahen Atmosphäre besonders dicht angeordnet, um die starke Variation der meteorologischen Grössen realistisch zu erfassen. Die Auswertungen der FITNAH-Modellierung beziehen sich auf das bodennahe Niveau der Modellrechnung (2 m ü. Gr. = Aufenthaltsbereich der Menschen).

3.2 Synoptische Rahmenbedingungen

Während sogenannter autochthoner („eigenbürtiger“) Wetterlagen können sich die lokalklimatischen Besonderheiten in einer Region besonders gut ausbilden, da es nur eine geringe „übergeordnete“ Windströmung gibt. Eine solche Wetterlage wird durch wolkenlosen Himmel und einen nur sehr schwachen überlagernden synoptischen Wind gekennzeichnet, sodass sich die lokalklimatischen Besonderheiten einer Stadt besonders gut ausprägen. Dahingehend wurden die grossräumigen synoptischen Rahmenbedingungen folgendermassen festgelegt:

- Relative Feuchte der Luftmasse 50 %
- Wolkenloser Himmel
- Kein überlagernder geostrophischer Wind
- Lufttemperatur über Freiland um 21:00 Uhr in Anlehnung an die in Kap. 3.4.2 beschriebenen Referenzstationen



Um im Zukunftsszenario die klimawandelbedingte Zunahme der Wärmebelastung abzubilden, ist die Antriebstemperatur der Modellrechnung um +2,6 K erhöht worden. Das entspricht der Änderungen der sommerlichen Mitteltemperatur gegenüber der Referenzperiode 1981 bis 2010 für das Bezugsjahr 2060 im RCP-Szenario 8.5 (vgl. Kap. 3.4.4).

Die vergleichsweise geringen Windgeschwindigkeiten bei einer austauscharmen Wetterlage bedingen einen herabgesetzten Luftaustausch in der bodennahen Luftschicht und tragen zur Anreicherung von Luftschadstoffen bei. Bei gleichzeitiger Wärmebelastung in den Siedlungsflächen können sich lokal bioklimatische und lufthygienische Belastungsräume ausbilden. Diese Wettersituation stellt damit ein „Worst-Case“-Szenario dar. Charakteristisch für diese (Hochdruck-) Wetterlage ist hingegen die Entstehung eigenbürtiger Kaltluftströmungen (Flurwinde und Kaltluftabflüsse), die durch den Temperaturgradienten zwischen kühlen Freiflächen und wärmeren Siedlungsräumen angetrieben werden und zu einem Abbau der Belastungen beitragen. In Abb. 3.1 sind schematisch die für eine austauscharme sommerliche Wetterlage simulierten tageszeitlichen Veränderungen der Temperatur und Vertikalprofile der Windgeschwindigkeit zur Mittagszeit für die Landnutzungen Freiland, Stadt und Wald dargestellt.

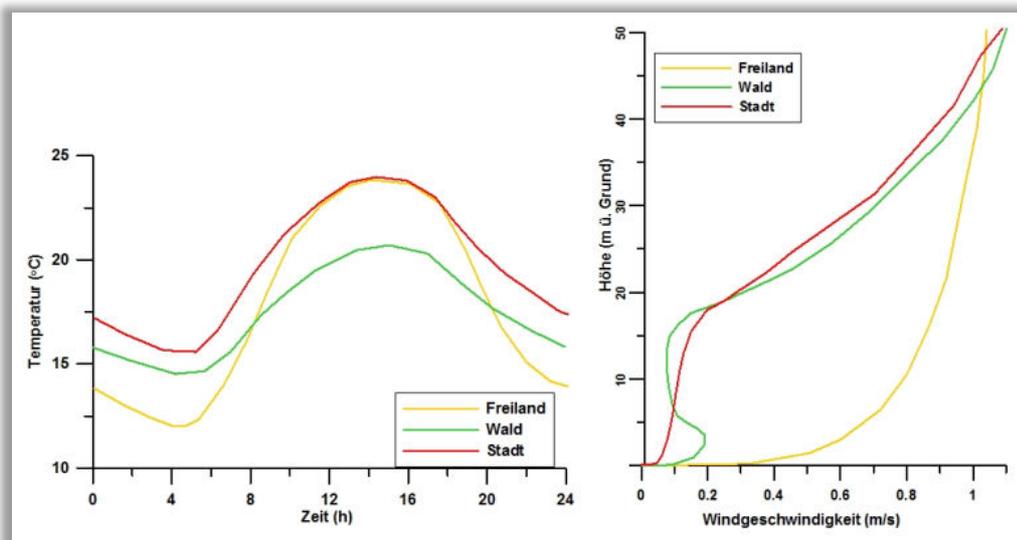


Abb. 3.1: Temperaturverlauf und Vertikalprofil der Windgeschwindigkeit zur Mittagszeit für verschiedene Landnutzungen

Hinsichtlich des Temperaturverlaufs über 24 Stunden zeigt sich, dass sowohl Freiflächen wie z.B. Wiesen als auch Bebauung ähnlich hohe Temperaturen zur Mittagszeit aufweisen können, die nächtliche Abkühlung der Siedlungsflächen vor allem durch die Wärme speichernden Materialien hingegen deutlich geringer ist. Bei den durch Wiese geprägten Arealen oder auch Freilandflächen trägt der Mangel an Verschattung zum hohen Temperaturniveau in den Mittagsstunden bei, während hier nachts die Abkühlung am stärksten ist. Waldflächen nehmen eine vermittelnde Stellung ein, da die nächtliche Auskühlung durch das Kronendach gedämpft wird. Hinsichtlich der Windgeschwindigkeit wird der Einfluss von Bebauung und Vegetationsstrukturen im Vertikalprofil deutlich.



3.3 Abgrenzung der klimaökologischen wirksamen Nutzungsstrukturen

Ziel der Eingangsdatenaufbereitung ist es, aus den flächenhaft vorliegenden Nutzungsinformationen punkthaft gerasterte Modelleingangsdaten mit einer Maschenweite von 5 m zu erzeugen. Aus diesen punkthaften Repräsentationen der Eingangsvariablen ergeben sich die in gleicher Weise aufgelösten Modellergebnisse in Form flächenhaft berechneter Klimaparameter (Abb. 3.2). Qualifizierende Aussagen zur bioklimatischen Bedeutung bestimmter Areale können sich allerdings nicht auf einzelne Rasterzellen beziehen. Hierfür muss eine Zonierung des Untersuchungsraumes in klimatisch ähnliche Flächeneinheiten erfolgen. Diese sollten in der Realität nachvollziehbar und administrativ oder nutzungstypisch abgrenzbar sein. Um die Ausprägung der Klimaparameter auf planungsrelevante und massstabsgerechte Einheiten zu übertragen, wurden den Referenzflächen der verwendeten digitalen Nutzungsinformationen die relevanten Klimaparameter wie z.B. Lufttemperatur oder Kaltluftvolumenstrom zugeordnet. Dafür wurden alle Rasterzellen, die von einer bestimmten Fläche überdeckt werden, mit Hilfe zonaler Analysen zusammengefasst und statistisch ausgewertet. Auf diese Weise erhält jede Fläche den Mittelwert der für eine Bewertung relevanten Klimaparameter, welcher die flächenspezifische Werteausprägung repräsentiert. So führt beispielsweise die hohe Oberflächenversiegelung einer Gewerbebebauung in den Nachtstunden zu einem höheren Flächenmittelwert der Lufttemperatur, als eine stark durchgrünte Wohnbebauung am Ortsrand.

Aufgrund dieser Vorgehensweise liegen die Ergebnisse der Klimaanalyse in zweifacher Form vor: Zum einen als hochaufgelöste rasterbasierte Verteilung der Klimaparameter im räumlichen Kontinuum (vgl. Kap.4), zum anderen als planungsrelevante und massstabsgerechte, räumlich in der Realität abgrenzbare Flächeneinheiten (vgl. Kap. 6). Auf diese Weise bleibt, in Ergänzung zur abstrahierten Darstellung der klimatischen Funktionszusammenhänge (als Flächen- und Beziehungstypen in den Synthesekarten), die flächeninterne Heterogenität der Klimaparameter als Detailinformation jederzeit abrufbar.

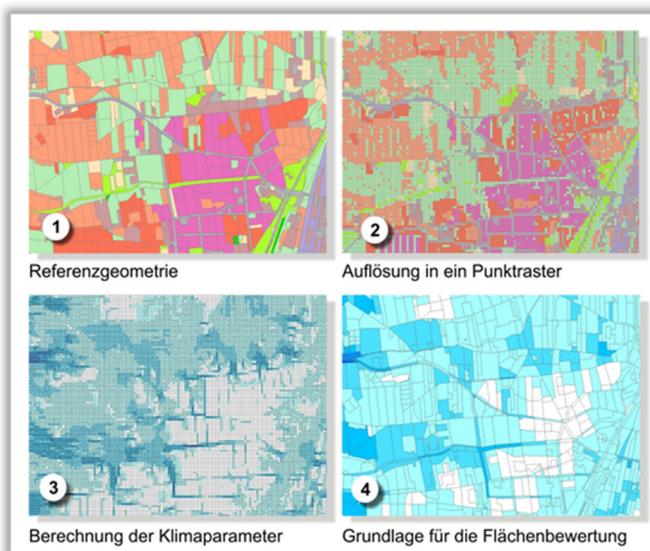
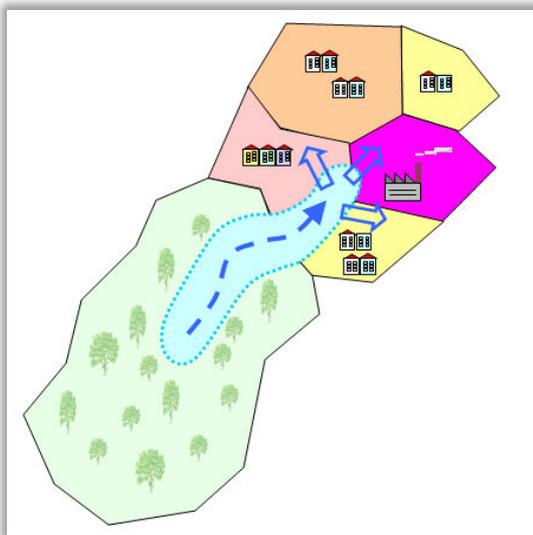


Abb. 3.2: Schema der Wertezuordnung zwischen Flächen- und Punktinformation



KALTLUFTLEITBAHNEN

Leitbahnen verbinden Kaltluftentstehungsgebiete (Ausgleichsräume) und Belastungsbereiche (Wirkungsräume) miteinander und sind somit elementarer Bestandteil des Luftaustausches (Abb. 3.3). Die Ausweisung der Leitbahnbereiche orientiert sich am autochthonen Strömungsfeld der FITNAH-Simulation und wird in der Klimaanalysekarte dargestellt. Als geeignete Oberflächenstrukturen innerhalb von Siedlungsräumen, die ein Eindringen von Kaltluft in die Bebauung erleichtern, dienen sowohl gering bebaute Freiflächen mit eher niedriger Vegetation, Kleingärten und Friedhöfe als auch Gleisareale und breite Strassenräume. Kaltluftabflüsse treten über unbebauten Hangbereichen auf, sofern sie Neigungen von $\geq 1^\circ$ aufweisen. Aufgrund der vergleichsweise höheren Dichte von Kaltluft setzt sie sich, dem Gefälle folgend, hangabwärts in Bewegung.



Durch diese „Beschleunigung“ weisen Kaltluftabflüsse meist höhere Strömungsgeschwindigkeiten auf als Strömungen, die sich nur aufgrund des Temperaturunterschiedes zwischen kühlen Freiflächen und überwärmter Bebauung einstellen. Aus siedlungsklimatischer Sicht sind daher Abflüsse als sehr wirksam zu bewerten. Diese werden in der Karte „Kaltluftsystem“ ausgewiesen.

Abb. 3.3: Prinzipskizze Kaltluftleitbahn

3.4 Klimatische Grundlagen

Für die stadt- bzw. siedlungsklimatische Analyse der Stadt Bern benötigt das verwendete Modell FITNAH meteorologische Eingangsdaten, die als modellinterner Antrieb fungieren. Idealerweise werden hierfür Messdaten verwendet, die an Tagen mit autochthoner Wetterlage (strahlungsreiche, windschwache Hochdruckwetterlage) erhoben wurden, um die bioklimatische Bedeutung bestmöglich abbilden zu können. Die Darstellung der Klimaparameter an dieser Stelle beruht auf den bei Meteo Schweiz vorhandenen Grafiken und Auswertungen in den Sommermonaten. Sie beziehen sich, sofern nicht anderweitig angegeben, auf den Standort der MeteoSwiss-Station Bern/Zollikofen.

Das Klima charakterisiert den mittleren Zustand der Atmosphäre an einem bestimmten Ort bzw. Gebiet und wird durch die statistischen Gesamteigenschaften über einen genügend langen Zeitraum repräsentiert (Mittelwerte, Extremwerte, Häufigkeiten, etc.). Im Allgemeinen werden Zeiträume von 30 Jahren zugrunde gelegt. In der Schweiz gilt für die Beschreibung des Klimas jeweils die aktuellste Klimaperiode, momentan die Periode 1981-2010 (Begert et al. 2013) und beinhaltet damit auch schon den bereits beobachteten Klimawandel, der sich seit Mitte der 1980er Jahre bemerkbar macht.



3.4.1 Aktuelles Klima an der Wetterstation Bern/Zollikofen

Die Stadt bzw. auch der Kanton Bern sind dem mitteleuropäischen Kontinentalklima zuzuordnen, erstreckt sich innerhalb der Schweiz aber über die drei Grossregionen Jura, Mittelland sowie Alpen. Die Abbildung 3.4 zeigt ein Klimadiagramm für die Station Bern/Zollikofen für die Normperiode 1991 – 2020, die im folgenden Abschnitt exemplarisch für die Sommermonate kurz beschrieben werden soll.

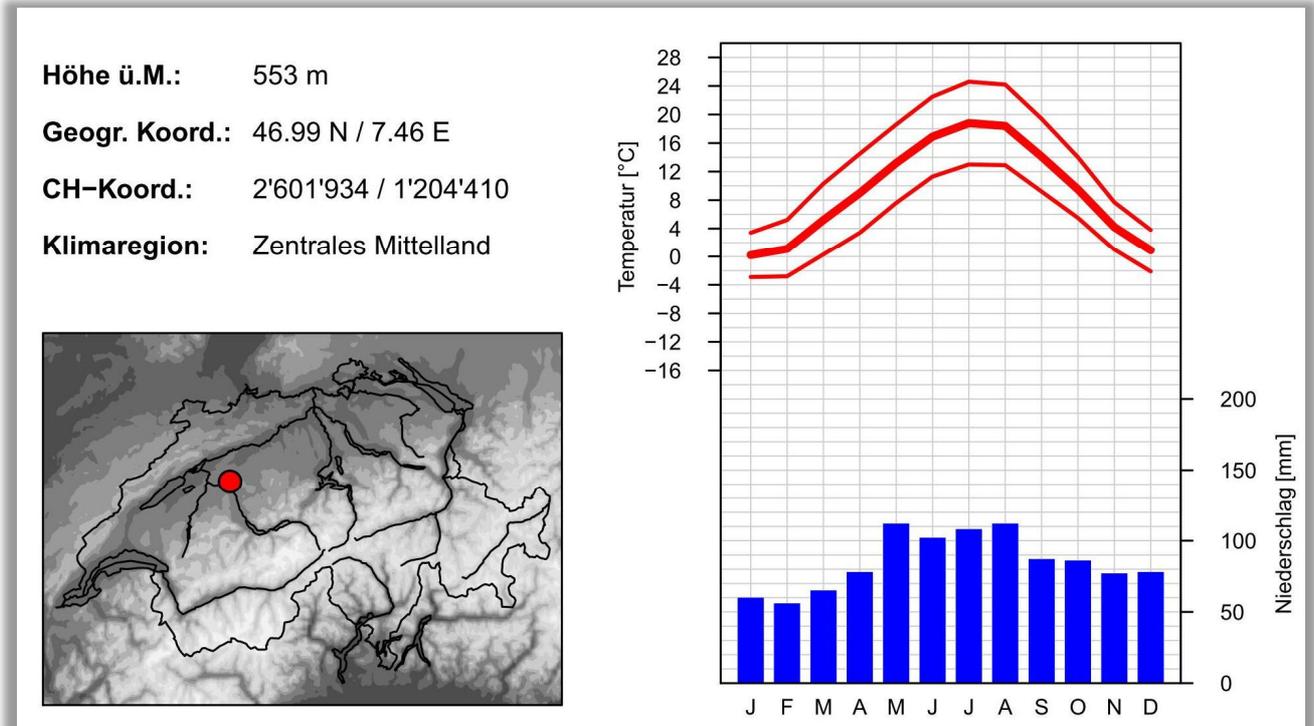


Abb. 3.4: Klimadiagramm Station Bern / Zollikofen, Normperiode 1991 – 2020 (Quelle: Meteoschweiz 2020b)

Für die Sommermonate Juni, Juli und August ist zu sehen, dass die Temperaturen im Monatsmittel unter 20° C verbleiben (dicke rote Linie im Diagramm). Die Maximaltemperaturkurve (obere rote Kurve) reicht in den Sommermonaten Juni, Juli und August hingegen weit über 20°C, im Juli sind es sogar 24,6°C. Im Juni sind 10 Tage, im Juli 15,5 Tage und im August 14 Tage als Sommertage (Maximaltemperatur am Tag > 25 °C) im Mittel gemessen worden. Hitzetage (Maximaltemperatur am Tag > 30 °C) gab es in der Anzahl weniger: für Juni 1,6; für Juli ca. 4 und für den August 3,4 Tage. Tropennächte sind an der Station Bern/Zollikofen für die Normperiode nicht ausgewiesen. Als Freilandstation ist sie daher nur begrenzt repräsentativ für die städtischen Verhältnisse. Der Juli ist der heisseste Monat des Sommers. Damit spiegelt die für die FITNAH-3D angenommene Starttemperatur am Abend von 21 °C in 2 m Höhe eine mittlere sommerliche Situation wider. Die mittlere Temperatur gibt für die Wintermonate Dezember, Januar und Februar positive Werte über Null °C an. Die Minimumtemperatur (untere rote Kurve) zeigt jedoch noch geringe Minusgrade von -2,1 °C für den Dezember und -2,9 im Januar. Den Temperaturen gegenüber stehen in der Abbildung 3.4 der Niederschlag. Die monatlichen Niederschlagssummen sind in den Sommermonaten mit jeweils über 100 mm als Monatssumme am höchsten, wobei die maximale Niederschlagssumme im Mai mit 112 mm genauso hoch ist wie im Juli. Somit gehen die über das Jahr betrachtet höchsten monatlichen Niederschlagssummen mit den wärmsten Monaten einher. Ob dieser Niederschlag für die Versorgung der Vegetation ausreichend ist, gibt die Grafik nicht wieder.



3.4.2 Beobachteter Klimawandel an Wetterstationen

Die Zunahme der Schweizer Mitteltemperatur seit 1864 bis heute beträgt rund 2 °C. Das ist im Vergleich zur Zunahme der mittleren globalen Temperatur im gleichen Zeitraum von 0,8 °C deutlich mehr und liegt hauptsächlich an der zentralen kontinentalen Lage der Schweiz. Wird der Blick gen Zukunft gewandt, so ermitteln die Klimaszenarien CH2018 eine Temperaturzunahme für die Schweiz zum vorindustriellen Zeitalter bis 2100 von +6 °C (Begert et al. 2019), was jedoch mit konsequentem Klimaschutz auf 2,5°C für die Schweiz begrenzt werden kann. Dem Schweizer Mittelland wird eine hohe Zunahme der Temperatur aufgrund des Klimawandels vorhergesagt. In der Abbildung 3.5 ist die Entwicklung der Sommertemperaturen für die Monate Juni, Juli und August seit dem Jahr 1864 im Vergleich zur Klimaperiode 1961 – 1990 aufgetragen, um die Trends der Entwicklung nachzuvollziehen. Es ist gut zu erkennen, dass es einen signifikanten positiven Trend der Sommertemperaturen (schwarze Linie) gibt. Die Jahre ab 2015 weichen alle von der Periode 1961 – 1990 mit über +3 °C ab. Das Jahr 2003 ist das mit der höchsten positiven Abweichung zur Periode von fast +5°C. Diese Grafik verdeutlicht, dass bereits jetzt der Klimawandel stattfindet und in den Messreihen beobachtet werden kann. Seit den 1980er Jahren steigen die Temperaturen deutlich an und bleiben auch auf hohem Niveau.

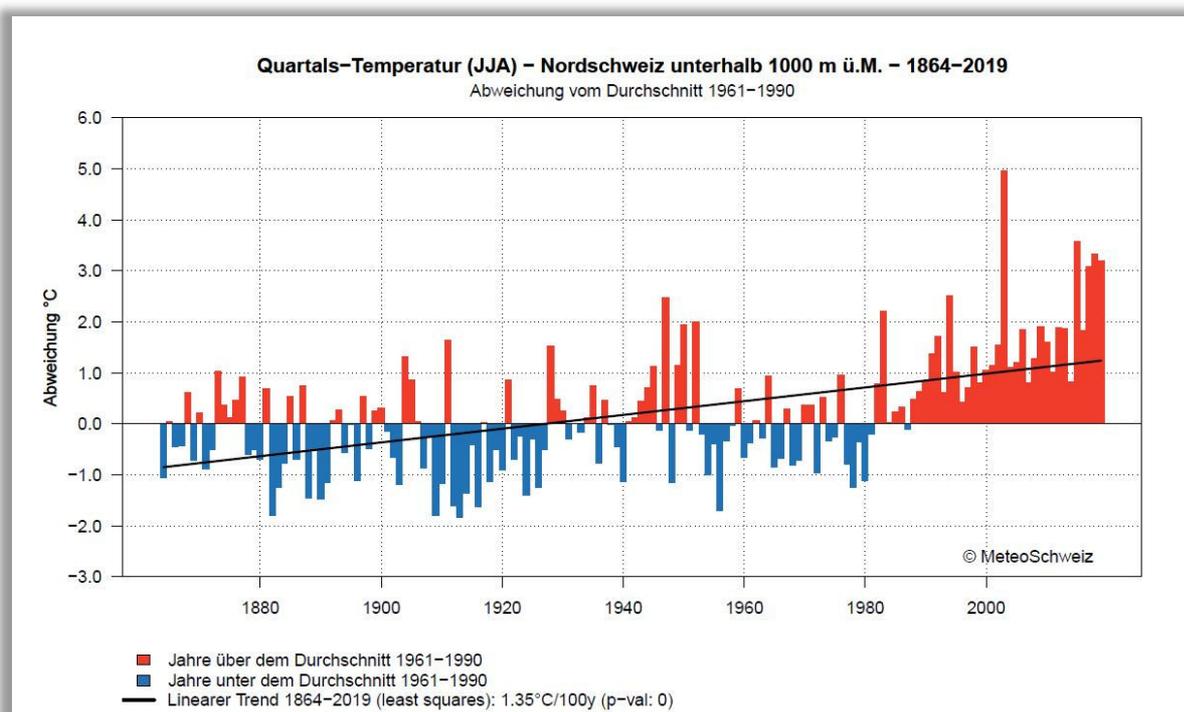


Abb. 3.5: Entwicklung der sommerlichen Temperatur für die Nordschweiz unter 1.000 m ab 1864 bis heute im Vergleich zur Periode 1961 – 1990 (Quelle: Meteoschweiz 2020d)

Abbildung 3.6 zeigt die langjährige Entwicklung der Niederschlagssummen im Vergleich zur Klimaperiode 1961 – 1990 für die Nordschweiz für Gebiete unter 1.000m. Hier ist kein signifikanter Trend zu sehen und die Werte schwanken positiv als auch negativ um den Durchschnitt der Klimaperiode 1961 – 1990.

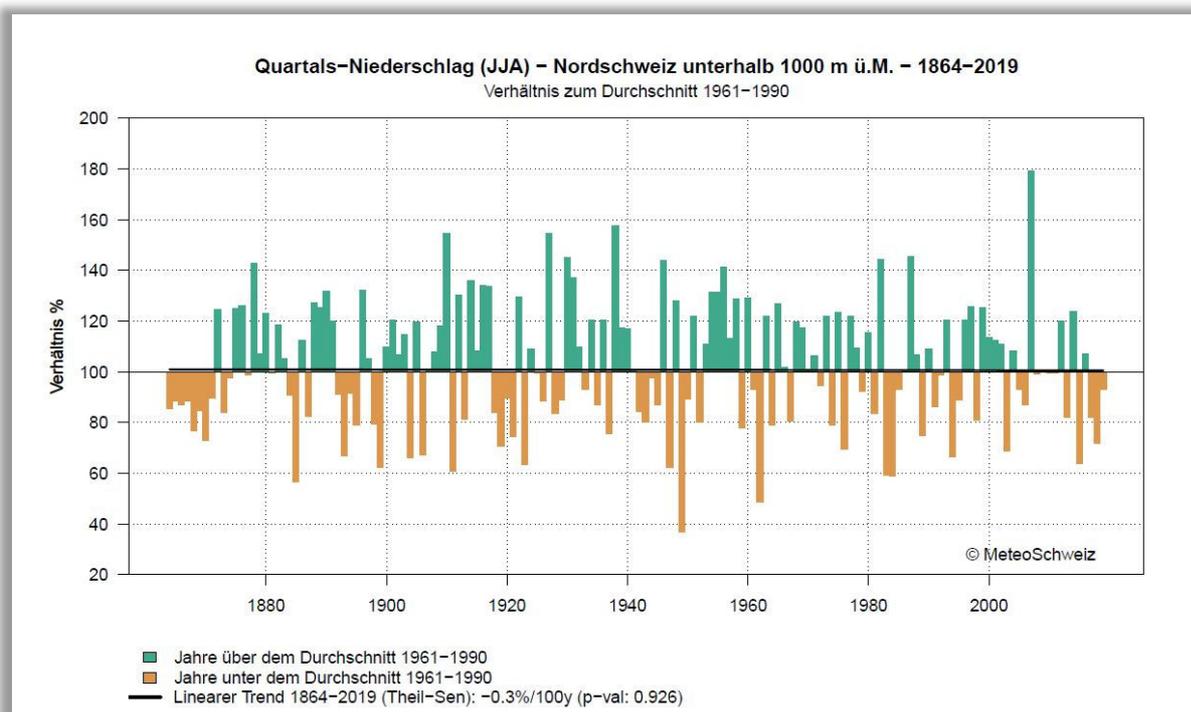


Abb. 3.6: Entwicklung der sommerlichen Niederschlagssummen für die Nordschweiz unter 1.000 m ab 1864 bis heute im Vergleich zur Periode 1961 – 1990 (Quelle: Meteoschweiz 2020d)

3.4.3 Hauptanströmrichtung

Die Abbildung 3.7 zeigt die Windrosen der Station Bern/Zollikofen für die Sommermonate Juni, Juli und August. Die Hauptwindrichtung der Station Bern/Zollikofen ist Nordnordost für Juni und Juli, hauptsächlich mit Windgeschwindigkeiten von $< 3\text{ m/s}$. Es treten jedoch auch Windgeschwindigkeiten von 3 bis unter 6 m/s auf, nicht nur in der Hauptwindrichtung. Im August nimmt die südliche Strömungskomponente etwas zu, während die Häufigkeit einer Anströmung aus Nordnordost zurückgeht. Gleichzeitig gehen auch die auftretenden Windgeschwindigkeit tendenziell zurück. Dies zeigt sich einerseits an der Zunahme der Kalmen auf etwa 10 %. Kommt es zeitgleich zu einer hohen thermischen Belastung z.B. in den urban geprägten Räumen, so ist das Empfinden der Temperaturen deutlich höher, da die schwächeren auftretenden Winde für weniger Kühlung sorgen.

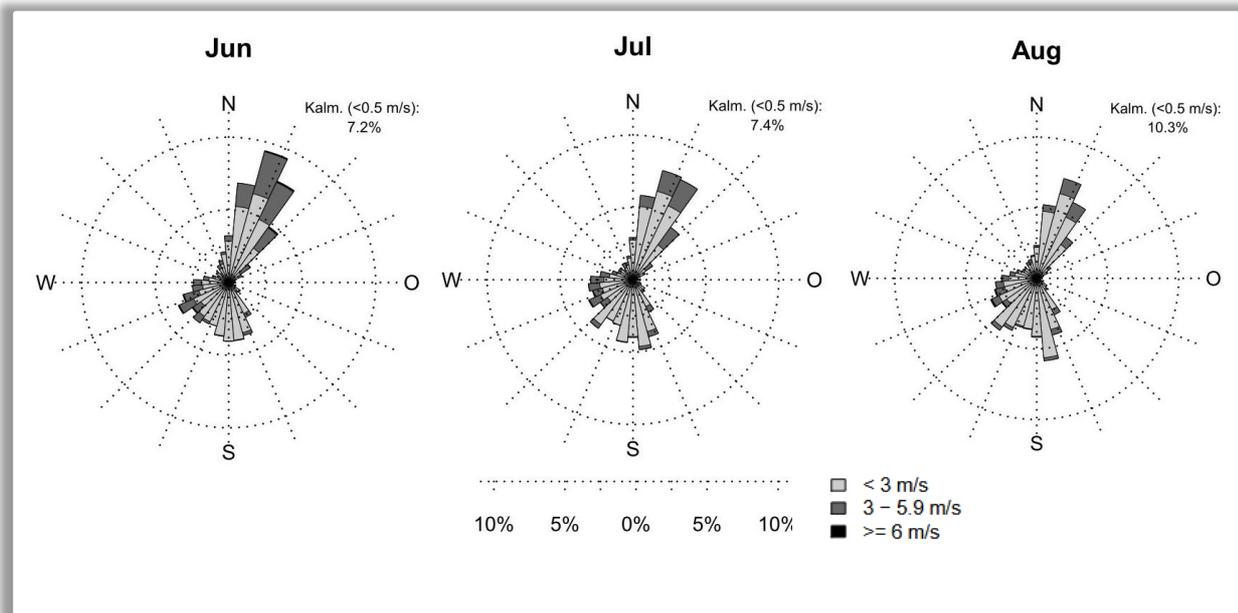


Abb. 3.7: Windrosen der Station Bern/Zollikofen 365 m ü.M. für die Sommermonate Juni, Juli und August (Quelle: Meteoschweiz 2020c).

3.4.4 Klimawandelszenario

Hauptverantwortlich für den Anstieg der globalen Mitteltemperaturen sind anthropogen bedingte CO₂-Emissionen. Da heute noch nicht absehbar ist, wie sich die CO₂-Emissionen zukünftig entwickeln, werden diese in Klimamodellen in Form von Szenarien mit unterschiedlicher CO₂-Entwicklung über die Zeit berücksichtigt, die bis zum Ende des Jahrhunderts einen bestimmten Strahlungsantrieb hervorrufen. Für Europa stehen aktuell drei verschiedene Klimaszenarien zur Verfügung: RCP 2.6, 4.5 und 8.5 (RCP = Representative Concentration Pathways), die seit dem fünften IPCC-Bericht die SRES-Szenarien abgelöst haben (Special Report on Emissions Scenarios). Die Zahl in der Bezeichnung der Szenarien benennt den mittleren Strahlungsantrieb in Watt/m², der in ihrem projizierten Verlauf zum Ende des 21. Jahrhunderts erreicht wird (Moss et al. 2010; Abb. 3.8):

- Das RCP-Szenario 2.6 beschreibt einen Anstieg des anthropogenen Strahlungsantriebes bis zum Jahr 2040 auf ca. 3 W/m². Zum Ende des Jahrhunderts sinkt dieser langsam, aber stetig auf 2,6 W/m² ab. Die globale Mitteltemperatur würde in diesem Szenario das 2 °C-Ziel nicht überschreiten, sodass RCP 2.6 als „Klimaschutzszenario“ bezeichnet wird.
- RCP 4.5 zeigt einen steilen Anstieg des anthropogenen Strahlungsantriebes bis etwa zur Mitte des 21. Jahrhunderts, der danach bis ca. 2075 nur noch geringfügig steigt und in der Folge stagniert.
- Das RCP-Szenario 8.5 weist den stärksten Anstieg des Strahlungsantriebes auf, der sich bis zum Ende des Jahrhunderts nicht abschwächt und eine Zunahme der globalen Mitteltemperatur um ca. 4,8 °C gegenüber dem Zeitraum 1985 – 2005 bewirken würde. Das RCP 8.5 wird auch als „Weiter wie bisher-Szenario“ bezeichnet. Diese Situation liegt dem für die Stadt Bern modellierten Zukunftsszenario zugrunde.

Die weltweiten CO₂-Emissionen verzeichnen seit den 1950er-Jahren einen permanenten Anstieg. Aktuell befinden wir uns, nach den Ergebnissen des Global Carbon Projektes, mit den globalen CO₂-Emissionen auf



dem „Pfad“ des RCP-Szenarios 8.5 (Boden 2017, Peters et al. 2013). Selbst ein abrupter weltweiter Rückgang des CO₂-Ausstosses würde, aufgrund der Trägheit des Klimasystems, in Kürze keine signifikante Änderung herbeiführen.

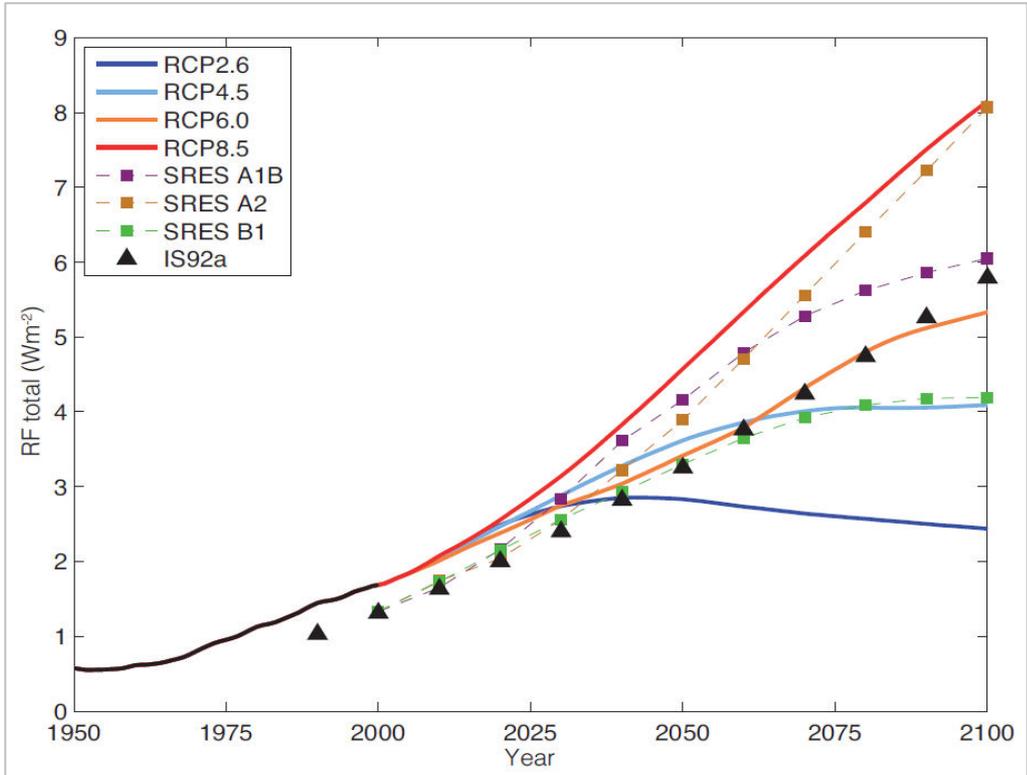


Abb. 3.8: Anthropogener Strahlungsantrieb der verschiedenen IPCC-Klimaszenarien (die schwarze Linie repräsentiert Messwerte; Cubasch et al. 2013)

Die Abb. 3.9 zeigt die Abweichung der gemessenen mittleren sommerlichen Lufttemperaturen von der Normperiode 1981-2010 für die Regionen Mittelland und Voralpen sowie die Projektion für die RCP-Szenarien 2.6 und 8.5. Im 30-jährigem Mittel lässt sich für beide Regionen eine deutliche Zunahme der Temperatur ab den 80er Jahren beobachten.



Temperatur

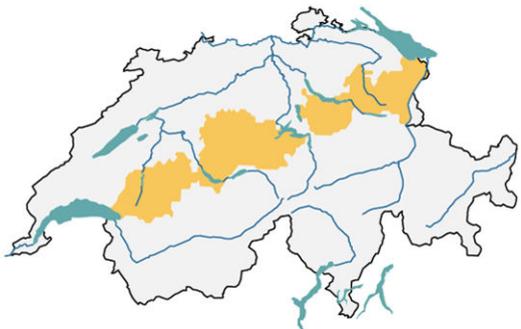
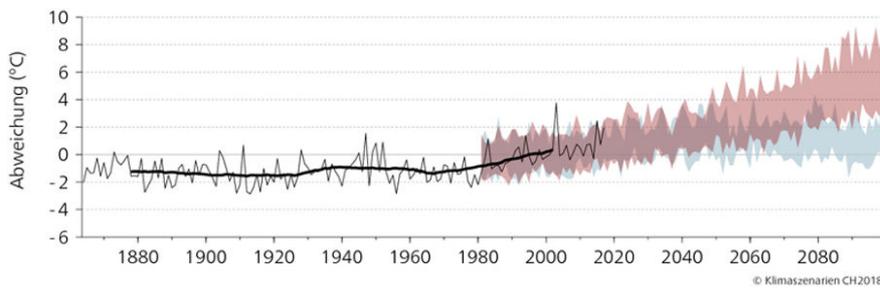
Abweichung von der Normperiode 1981-2010

Mittelland

— Beobachtungen
— 30-jähriges gleitendes Mittel

— RCP2.6
— RCP8.5

Sommer



Temperatur

Abweichung von der Normperiode 1981-2010

Voralpen

— Beobachtungen
— 30-jähriges gleitendes Mittel

— RCP2.6
— RCP8.5

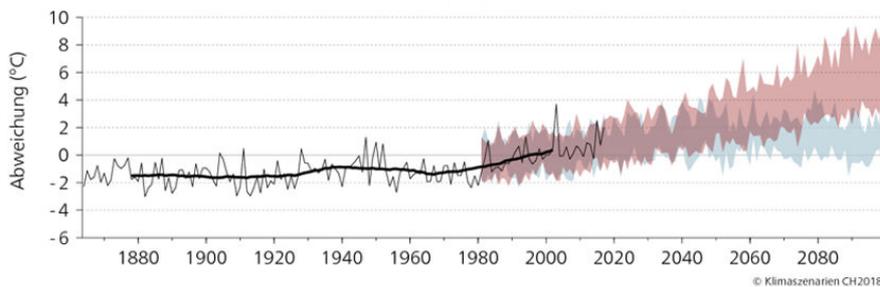


Abb. 3.9: Gemessene und projizierte Abweichung der sommerlichen Lufttemperaturen von der Normperiode 1981-2010 in den Regionen Mittelland und Voralpen (NCCS 2018)

Im weiteren Verlauf der Messungen festigt sich seit dem Jahr 2000 der Trend stetig steigender Temperaturen. Dieser entwickelt sich je nach betrachtetem RCP-Szenario in unterschiedliche Richtungen. Während sowohl im Szenario 2.6 und 8.5 bis etwa 2040 ein ähnlich ausgeprägter Anstieg zu erwarten ist, steigen die Temperaturen im Szenario 8.5 danach weiter an. Hier wird zum Ende des Jahrhunderts eine Abweichung



gegenüber der Normperiode 1981-2010 in einer Grössenordnung von 5 bis 6 °C projiziert. Im „Klimaschutz-Szenario“ 2.6 hingegen ist der Anstieg mit 1 °C wesentlich niedriger.

Die Abbildung 3.10 zu den Sommertagen und Hitzetagen für die Station Bern/Zollikofen verdeutlichen die kontinuierliche Zunahme der meteorologischen Kenntage Sommer- und Hitzetage bis in die zweite Hälfte des Jahrhunderts. Sommertage sind Tage, wo die maximale Tagestemperatur $\geq 25^{\circ}\text{C}$ ist, Hitzetage sind Tage, an denen die Maximaltemperatur am Tag 30°C übersteigt. Die Graphiken zeigen die Entwicklung für das RCP-Szenario 2.6 mit Klimaschutzmassnahmen (links) und das pessimistische RCP-Szenario 8.5 ohne Massnahmen (rechts). Das dem simulierten Zukunftsszenario zugrunde liegende RCP-Szenario 4.5 (Mitte) nimmt eine vermittelnde Stellung ein.

Bei den Sommertagen zeigt sich für das Szenario 2.6 eine Zunahme von ca. 42 im Jahr 1995 auf etwa 56 im Bezugsjahr 2035. Dieser Wert steigt bis 2060 auf 58 an und bleibt bis zum Betrachtungsjahr 2085 unter der Annahme wirksamer globaler Massnahmen zum Klimaschutz annähernd stabil. Im Szenario 4.5 ist die Anzahl der Sommertage für 2035 zunächst mit dem Szenario 2.6 vergleich, steigt allerdings bis 2060 auf durchschnittlich 66,4 Tage/Jahr an. Im Jahr 2085 ist der weitere Anstieg auf ca. 69 Sommertage/Jahr moderat.

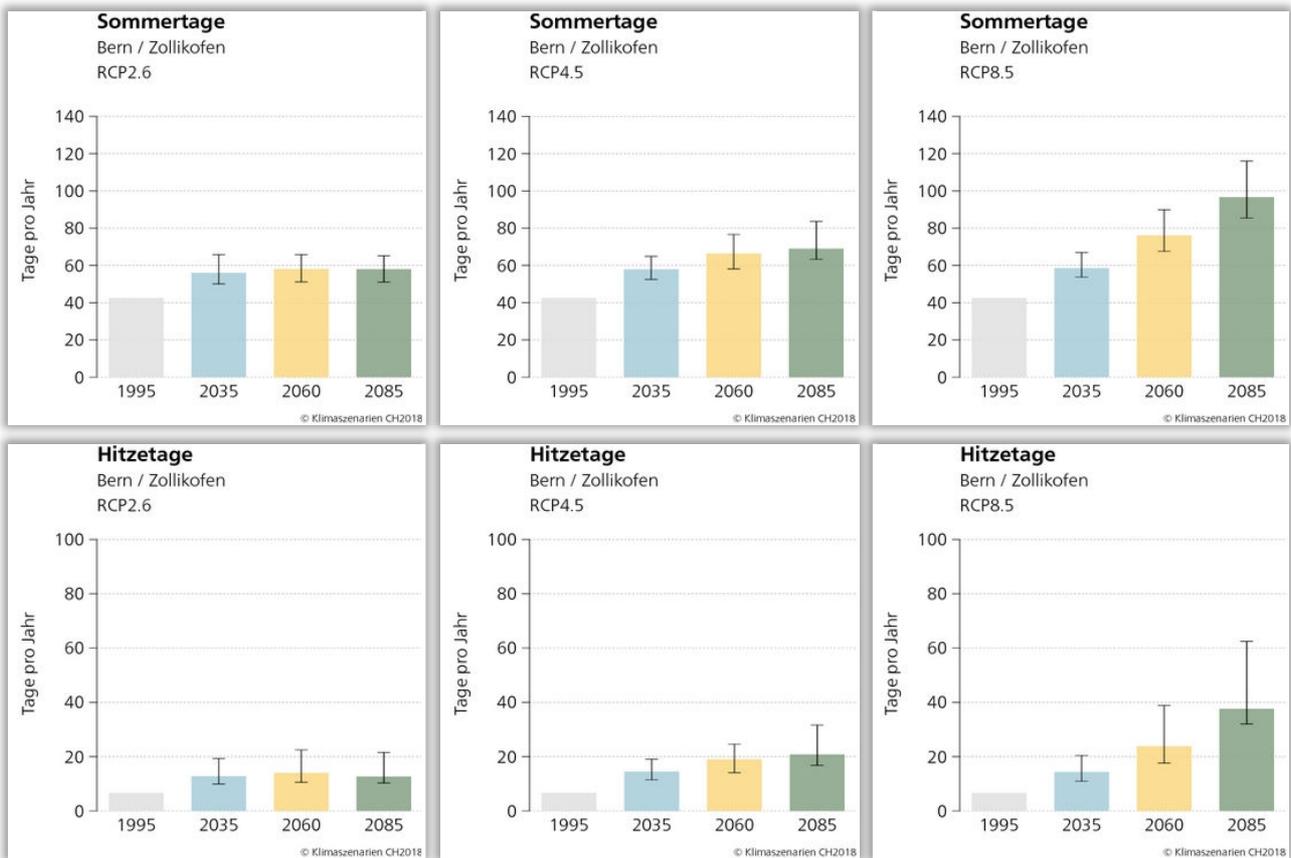


Abb. 3.10: Entwicklung der Sommer- und Hitzetage an der Station Bern/Zollikofen. Quelle: (NCCS 2018)

Für das Szenario 8.5 ist hingegen eine kontinuierliche Zunahme zu verzeichnen, welche für das Jahr 2085 mit über 96,6 angegeben wird. Die für die Sommertage beschriebene Charakteristik für das Szenario 2.6 zeigt sich in ähnlicher Weise auch für die Hitzetage, wobei - ausgehend von 6,6 Tagen im Jahr 1995 - das Maximum mit 14 Tage/Jahr ab 2060 nicht mehr markant ansteigt. Im Betrachtungsjahr 2035 ist die Anzahl der Hitzetage



mit ca. 14 in den Szenarien 4.5 und 8.5 noch ähnlich ausgeprägt. Bis zum Jahr 2060 nimmt die Zahl der Hitzetage im Szenario 4.5 auf 19 zu, im Szenario 8.5 beträgt sie bereits knapp 24. Bis 2085 steigt im Szenario 4.5 die Anzahl an Hitzetagen moderat auf etwa 21 an, während für das Szenario 8.5 nunmehr 37,6 Hitzetage angenommen werden. Verglichen mit dem Szenario 2.6 stellt dies eine Verdreifachung dar.



4. Ergebnisse der Klimamodellierung

Im Folgenden werden die Modellergebnisse zu den Parametern Lufttemperatur bzw. Physiologisch Äquivalente Temperatur in 2 m Höhe, Kaltluftströmungsfeld sowie Kaltluftvolumenstrom erläutert. Dargestellt werden die Ergebnisse an beispielhaft ausgewählten Ausschnitten für die Gegenwart und das Zukunftsszenario. Als meteorologische Rahmenbedingung wurde eine austauscharme Wetterlage zugrunde gelegt, da sich die siedlungsklimatischen Effekte vor allem unter windschwachen Bedingungen mit wolkenlosem Himmel im Sommer entwickeln. Auslöser dieser Prozesse sind die Temperaturunterschiede zwischen vergleichsweise warmen Siedlungsräumen und kühleren vegetationsgeprägten Freiflächen. Die in Kap. 3.4 beschriebene Referenzstation wurde sowohl für den Modellantrieb als auch die Validierung der Ergebnisse herangezogen.

Für das Zukunftsszenario im Jahr 2060 wird eine mittlere sommerliche Temperaturzunahme von 2,6 K zugrunde gelegt (vgl. Kap. 3.4.4). Die unterschiedlichen Nutzungsstrukturen wirken darauf verstärkend (überbaute Räume) oder abschwächend (Grünräume) ein. Im Allgemeinen werden aber sowohl die Grünflächen als auch der Siedlungsraum wärmer. Daher ist der Wärmeinseleffekt oftmals nur geringfügig höher als in der Ist-Situation und die Kaltluftlieferung der Grünflächen ebenfalls vergleichbar mit der Ist-Situation ausgeprägt. Die Grünflächen liefern weiterhin kalte Luft, allerdings ist diese etwas wärmer verglichen mit der Gegenwart, aber immer noch kühler als jene in den Siedlungsräumen. Die relativen Temperaturunterschiede zwischen den Landnutzungen sowie der Luftaustausch insgesamt bleiben ähnlich ausgeprägt. Der in den folgenden Abbildungen enthaltene Ausschnitt des Stadtgebietes wurde dahingehend ausgewählt, einen möglichst vielgestaltigen Bereich des Berner Stadtgebietes darzustellen. So lassen sich die klimatischen Funktionszusammenhänge zwischen Stadtstrukturen und den jeweiligen meteorologischen Parametern gut vergleichbar an einer Örtlichkeit nachvollziehen.

4.1 Nächtliches Temperaturfeld

Der Tagesgang der Lufttemperatur ist direkt an die Strahlungsbilanz eines Standortes gekoppelt und zeigt daher i.d.R. einen ausgeprägten Abfall während der Abend- und Nachtstunden. Dieser erreicht kurz vor Sonnenaufgang des nächsten Tages ein Maximum. Das Ausmass der Abkühlung kann, je nach meteorologischen Verhältnissen, Lage des Standorts und landnutzungsabhängigen physikalischen Boden- bzw. Oberflächeneigenschaften, grosse Unterschiede aufweisen. Besonders auffällig ist das thermische Sonderklima der Siedlungsräume mit seinen gegenüber dem Umland modifizierten klimatischen Verhältnissen.

Allgemeines

Das Ausmass der Temperaturabweichung im **Siedlungsbereich** ist vor allem von der Grösse der Stadt und der Dichte der Überbauung abhängig. Doch auch über **grünbestimmten Flächen** weisen Luftvolumina keinen einheitlichen Wärmezustand auf. Die Abkühlungsrate natürlicher Oberflächen wird insbesondere von ihren thermischen Bodeneigenschaften (Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität) sowie eventuell vorhandenen Oberflächenbedeckungen bestimmt (Bewuchs, Laubstreu, etc.). Dynamische Luftaustauschprozesse zwischen den Flächen, das Relief in Form von Geländehöhe, Exposition sowie Geländeneigung und die Lage im Mosaik der Landnutzungen üben weitere Einflüsse aus (bspw. macht es einen Unterschied, ob sich eine



Freifläche neben einem Gewässer, Waldgebiet oder dicht versiegelten Bereich befindet). Eine Sonderstellung nehmen Wald- und Gewässerflächen ein.

Waldflächen

Der gedämpfte, insgesamt vermittelnde Tagesgang der Temperatur im Wald beruht zu einem grossen Teil auf dem zweischichtigen Strahlungsumsatz zwischen Atmosphäre und Kronendach sowie zwischen Kronendach und Stammraum. Grössere Waldgebiete sind wichtige Frischluftproduktionsgebiete, in denen sauerstoffreiche und wenig belastete Luft entsteht. Während im Stammraum tagsüber durch Verschattung und Verdunstung relativ geringe Temperaturen bei hoher Luftfeuchtigkeit vorherrschen, treten nachts durch die abschirmende Wirkung des Kronendachs vergleichsweise milde Temperaturen auf. Stadtnahe Wälder können demnach auch am Tage Kaltluft zugunsten des Siedlungsraumes erzeugen, nachts fällt deren Kaltluftproduktion dagegen geringer aus als über unversiegelten Freiflächen – ausserdem können sie ein Strömungshindernis darstellen.

Gewässer

Die hohe spezifische Wärmekapazität von Wasser, seine besondere Art der Strahlungsabsorption und die im Wasserkörper stattfindenden turbulenten Durchmischungsvorgänge sorgen für eine (von hohen Absolutwerten ausgehend) deutlich verringerte tägliche Temperaturamplitude über grösseren Gewässern. Da hier die Lufttemperaturen im Sommer tagsüber niedriger und nachts höher als in der Umgebung sind, wirken grössere Gewässer auf bebaute Flächen am Tage klimatisch ausgleichend, während sie in der Nacht deren Abkühlung verringern.

Die Ermittlung des bodennahen Temperaturfeldes ermöglicht es, Bereiche mit potenziellen bioklimatischen Belastungen abzugrenzen, Aussagen zum Auftreten thermisch und/oder orographisch induzierter Ausgleichsströmungen zu treffen und die räumliche Ausprägung sowie Wirksamkeit von Kalt- bzw. Frischluftströmungen abzuschätzen.

Gegenwärtige Situation

Die sich um 4 Uhr in der Nacht einstellenden Werte im Stadtgebiet umfassen gegenwärtig zwischen Minimalwerten von 13.2 °C und Maximalwerten von bis zu 21.5 °C eine Spannweite von etwa 8 °C. Die mittlere Temperatur innerhalb des Stadtgebietes liegt bei den angenommenen sommerlichen meteorologischen Rahmenbedingungen bei 17.5 °C. Unter dem Einfluss des Klimawandels steigt im Zukunftsszenario für das Betrachtungsjahr 2060 die mittlere Lufttemperatur auf 20.1 °C an. Das Minimum liegt dann lediglich bei 15.8 °C, während der Maximalwert 24,1°C beträgt.

Innerhalb der bebauten Gebiete ist die Temperaturverteilung räumlich differenziert, da Areale mit Einzelhausbebauung, Kernbebauung und Verkehrsanlagen unterschiedliche Boden- und Oberflächeneigenschaften aufweisen. Im Rahmen der durchgeführten Klimamodellierung weist der Kernbereich von Bern sowie die ausgedehnten Gewerbeflächen gegenwärtig die höchsten Temperaturen von mehr als 20 °C auf, was mit dem hohen Bauvolumen und der hohen Oberflächenversiegelung einher geht. Zur Peripherie hin nehmen Bebauungsdichte und auch die Lufttemperatur tendenziell ab, was sich deutlich



im Temperaturfeld beobachten lässt. In den durchgrünten Siedlungstypologien sind Werte zwischen 16.0 °C und 17.0 °C zu beobachten (Abb. 4.1). Innerhalb grösserer Hausgärten gehen die Temperaturen lokal auch weiter zurück. Je nach örtlichen Gegebenheiten führen lokale Kaltluftabflüsse zu einer zusätzlichen Abkühlung wie z.B. in Bern-Brunnadern. Die innerstädtischen Grünflächen zeichnen sich, abhängig von ihrer Grösse und Lage, mit einem niedrigeren Wertenniveau ab. So weisen der Rosengarten östlich der Altstadt Temperaturen zwischen 15.5 °C und 17 °C auf, während das Wertenniveau der Kleinen Schanze aufgrund der vergleichsweise geringeren Grösse und der Nähe zur Altstadt mit 16.5 °C bis 19.0 °C höher ausgeprägt ist (Abb. 4.2).

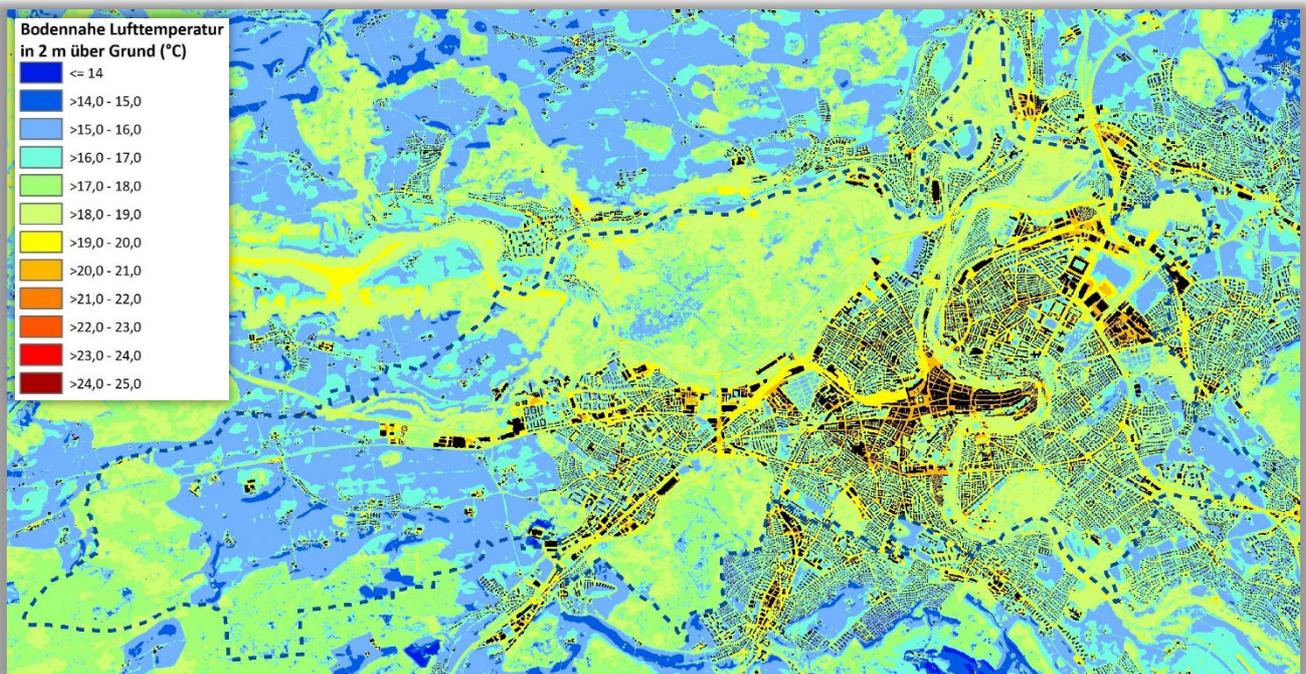


Abb. 4.1: Temperaturfeld Gegenwart im Stadtgebiet Bern zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens (2m ü. Grund)

Zukunftsszenario

Im Zukunftsszenario zeigt sich die klimawandelbedingte Zunahme der Lufttemperatur in einem insgesamt höheren Wertenniveau, welches ca. 2.6 °C über dem der Gegenwart liegt. So sind in den bereits jetzt überwärmten Teilbereichen perspektivisch für das Bezugsjahr 2060 Werte von 23,0 °C bis 24,0 °C anzutreffen. Die Situation für das Zukunftsszenario zeigt Abb. 4.2, wo im Innenstadtbereich nun flächenhaft Werte von mehr als 23 °C vorliegen. Kleinräumig kann die Lufttemperatur auch über 24 °C hinausgehen.

Die Temperaturen in den durchgrünten Siedlungstypologien steigen auf 18 °C bis 19 °C an und können hier über grösseren versiegelten Teilflächen oder Hauptverkehrsstrassen durchaus auch mehr als 20 °C betragen. Gegenüber der gegenwärtigen Situation steigt durch die zukünftige Bebauung in den Entwicklungsflächen das thermische Niveau an. In Waldarealen sowie über den ausgedehnten und meist landwirtschaftlich genutzten Freiflächen nimmt die Minimumtemperatur im Vergleich zur gegenwärtigen Situation je nach Höhenlage und örtlichen Gegebenheiten in einer Grössenordnung von 2,0 bis 2,6 K zu.

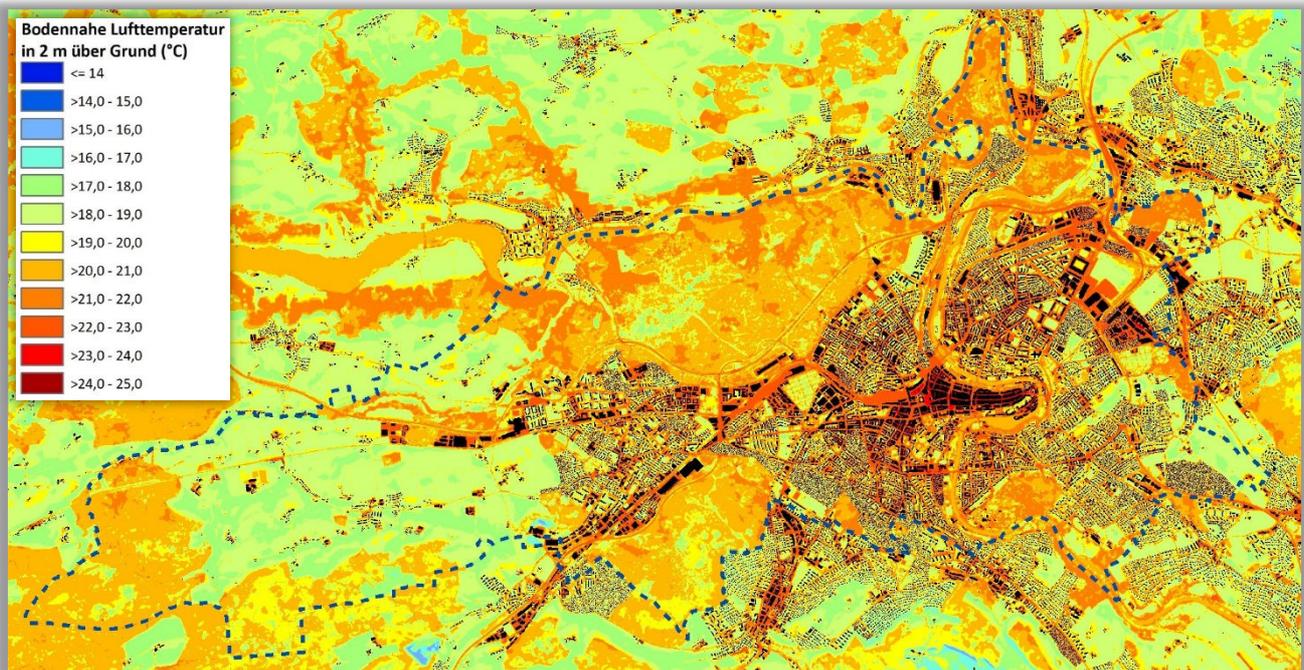


Abb. 4.2: Temperaturfeld Zukunftsszenario 2060 im Stadtgebiet Bern zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens (2m ü. Grund)

4.2 Physiologisch Äquivalente Temperatur

Meteorologische Parameter wirken nicht unabhängig voneinander, sondern in biometeorologischen Wirkungskomplexen auf das Wohlbefinden des Menschen ein. Zur Bewertung werden Indizes verwendet (Kenngrößen), die Aussagen zur Lufttemperatur und Luftfeuchte, zur Windgeschwindigkeit sowie zu kurz- und langwelligen Strahlungsflüssen kombinieren. Wärmehaushaltsmodelle berechnen den Wärmeaustausch einer „Norm-Person“ mit seiner Umgebung und können so die Wärmebelastung eines Menschen abschätzen². Beispiele für solche Kenngrößen sind die PET (Physiologisch Äquivalente Temperatur), der PMV-Wert (Predicted Mean Vote) und der UTCI (Universal Thermal Climate Index).

In der vorliegenden Arbeit wird zur Bewertung der Tagsituation der humanbioklimatische Index PET um 14:00 Uhr herangezogen (vgl. Höppe und Mayer 1987). Gegenüber vergleichbaren Indizes hat dieser den Vorteil, aufgrund der °C-Einheit auch von Nichtfachleuten besser nachvollzogen werden zu können. Darüber hinaus handelt es sich bei der PET um eine Grösse, die sich in der Fachwelt zu einer Art „Quasi-Standard“ entwickelt hat, sodass sich die Ergebnisse aus Bern mit denen anderer Städte vergleichen lassen. Wie die übrigen humanbiometeorologischen Indizes bezieht sich die PET auf aussenklimate Bedingungen und zeigt eine starke Abhängigkeit von der Strahlungstemperatur (Kuttler 1999). Mit Blick auf die Wärmebelastung ist sie damit vor allem für die Bewertung des Aufenthalts im Freien am Tage sinnvoll einsetzbar.

² Energiebilanzmodelle für den menschlichen Wärmehaushalt bezogen auf das Temperaturempfinden einer Durchschnittsperson („Klima-Michel“ mit folgenden Annahmen: 1,75 m, 75 kg, 1,9 m² Körperoberfläche, etwa 35 Jahre; vgl. Jendritzky 1990).



Für die PET existiert in der VDI-Richtlinie 3787, Blatt 9 eine absolute Bewertungsskala, die das thermische Empfinden und die physiologischen Belastungsstufen quantifizieren (z.B. Starke Wärmebelastung ab PET 35 °C; Tab. 4.1; VDI 2004).

PET	Thermisches Empfinden	Physiologische Belastungsstufe
4 °C	Sehr kalt	Extreme Kältebelastung
8 °C	Kalt	Starke Kältebelastung
13 °C	Kühl	Mässige Kältebelastung
18 °C	Leicht kühl	Schwäche Kältebelastung
20 °C	Behaglich	Keine Wärmebelastung
23 °C	Leicht warm	Schwache Wärmebelastung
29 °C	Warm	Mässige Wärmebelastung
35 °C	Heiss	Starke Wärmebelastung
41 °C	Sehr heiss	Extreme Wärmebelastung

Tab. 4.1: Zuordnung von Schwellenwerten für den Bewertungsindex PET während der Tagesstunden (nach VDI 2004)

Gegenwärtige Situation

Zum Zeitpunkt 14 Uhr zeigt sich, dass die auftretende Wärmebelastung am Tage vor allem über die Verschattung beeinflusst wird. In der gegenwärtigen Situation ist eine schwache Wärmebelastung mit einer PET von weniger als 29°C vor allem unter den grösseren Waldbeständen zu beobachten (Blau/Hellgrün; Abb. 4.3). Aber auch im Bereich grösser Baumgruppen von innerstädtischen Grünflächen sind günstige Aufenthaltsbedingungen anzutreffen. Dahingehend können in Bern der Elfenaupark, der Bereich Kleine Schanze und Florapark als innenstadtnahe Grünflächen mit hoher Aufenthaltsqualität angesehen werden. Je nach Baumbestand weisen auch grössere Hausgärten mit weniger als 35 °C eine schwache bis mässige Wärmebelastung auf.

Dem stehen die stark besonnten Areale gegenüber, wo die Wärmebelastung mit einer PET von deutlich mehr als 35°C meist als stark einzustufen ist (Gelb/Orange). Die höchsten Belastungen treten in den urbanen Räumen über den stark versiegelten Oberflächen und Platzbereichen ohne Verschattung auf (Magenta). Allerdings können auch die rasengeprägten Grünräume aufgrund der intensiven solaren Einstrahlung eine erhebliche Wärmebelastung aufweisen. Somit können Freiflächen wie das Viererfeld eine ähnlich hoch belastet sein wie der Freiraum Allmenden.

Zukunftsszenario

Im Zukunftsszenario ist unter dem Einfluss des Klimawandels auch am Tage von einer insgesamt stärkeren Wärmebelastung im Stadtgebiet auszugehen (Abb. 4.4). Dies zeigt sich auch in der simulierten PET, wobei die intensiv durch Vegetation verschatteten Bereiche auch weiterhin als Zonen mit höherer Aufenthaltsqualität hervortreten (blaue/hellgrüne Farben). Über den versiegelten Arealen nimmt die PET um durchschnittlich 2,5 C° bis 3,1 K zu, so dass gegenwärtig noch mässig wärmebelastete Siedlungsräume zukünftig eine starke Belastung aufweisen können. Sehr kleinräumig sind Zunahmen bis etwa 5 K zu



beobachten. Dies unterstreicht die Bedeutung siedlungsnaher Grünflächen mit ausreichender Verschattung als Aufenthaltsbereiche an Tagen mit starker Wärmebelastung.

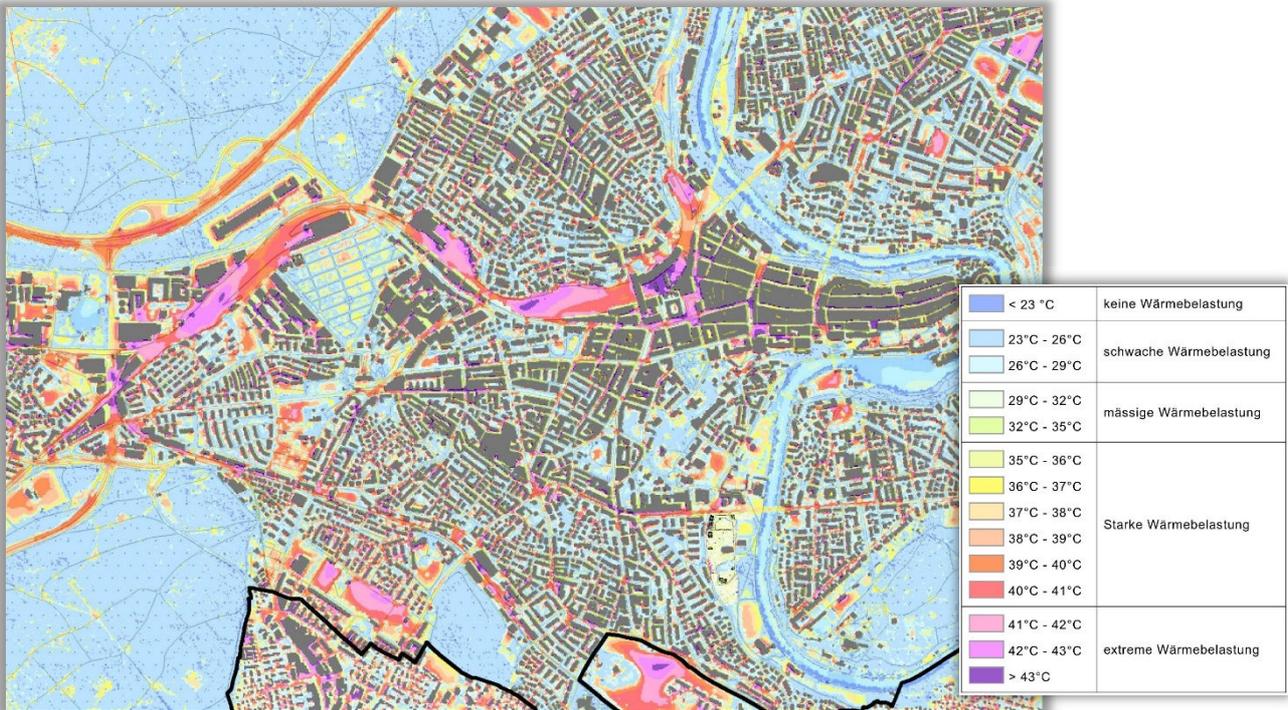


Abb. 4.3: PET Gegenwart zum Zeitpunkt 14 Uhr mittags (2m ü. Grund)

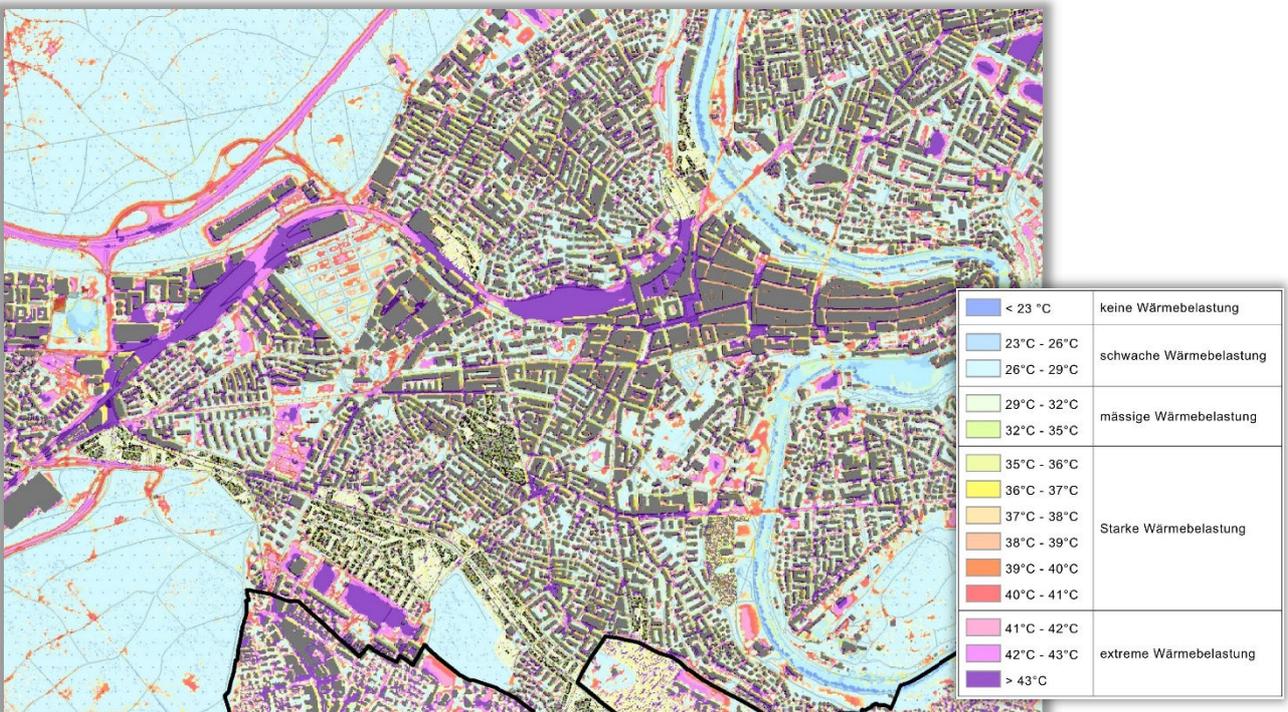


Abb. 4.4: PET Zukunftsszenario 2060 zum Zeitpunkt 14 Uhr (2m ü. Grund)



4.3 Autochthones Windfeld

Die bodennahe Temperaturverteilung bedingt horizontale Luftdruckunterschiede, die wiederum Auslöser für lokale, „autochthone“ thermische Windsysteme sind. Ausgangspunkt dieses Prozesses sind die nächtlichen Temperaturunterschiede, die sich zwischen Siedlungsräumen und vegetationsgeprägten Freiflächen einstellen. An den geneigten Flächen setzt sich abgekühlte und damit schwerere Luft in Richtung zur tiefsten Stelle des Geländes in Bewegung. So entstehen an den Hängen die nächtlichen Kaltluftabflüsse (u.a. Mosimann et al. 1999). Die Windgeschwindigkeit dieses kleinräumigen Phänomens wird in erster Linie durch das Temperaturdefizit zur umgebenden Luft und durch die Neigung des Geländes bestimmt. Neben den orographisch bedingten Strömungen mit Kaltluftabflüssen bilden sich auch so genannte Flur-/Strukturwinde, d.h. eine direkte Ausgleichsströmung vom hohen zum tiefen Luftdruck aus. Sie entstehen, wenn sich stark überbaute oder versiegelte Gebiete stärker erwärmen als umliegende Freiflächen und dadurch ein thermisches Tief über den urbanen Gebieten entsteht (vgl. Abb. 4.5).

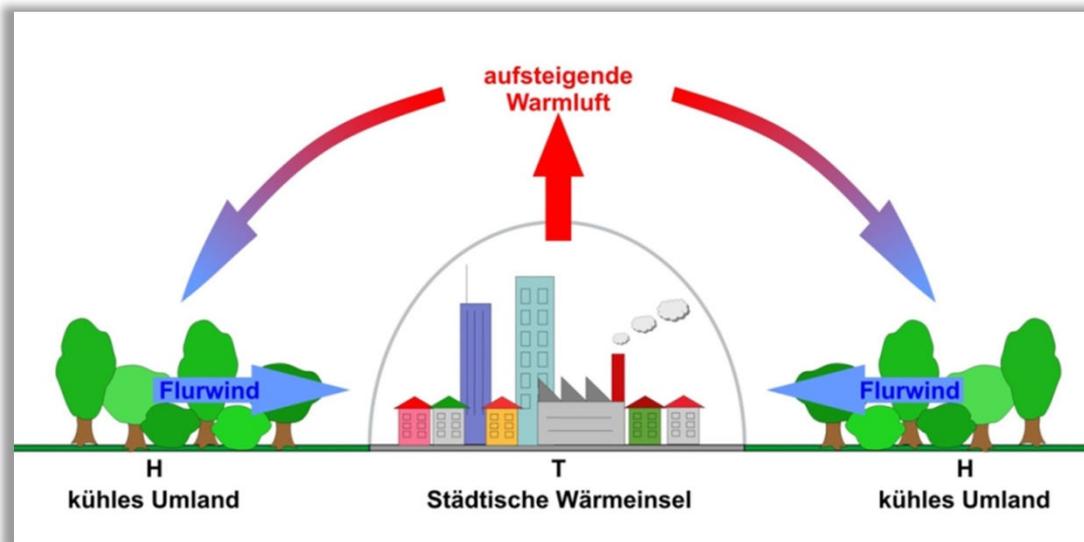


Abb. 4.5: Prinzipskizze Flurwind

Der resultierende Druckgradient kann daraufhin durch einströmende kühlere Luftmassen aus dem Umland ausgeglichen werden (u.a. Kiese et al. 1992). Für die Ausprägung dieser Strömungen ist es wichtig, dass die Luft über eine gewisse Strecke beschleunigt werden kann und nicht durch vorhandene Hindernisse wie Bebauung abgebremst wird. Die Flur-/ Strukturwinde sind eng begrenzte, oftmals nur schwach ausgeprägte Strömungsphänomene, die bereits durch einen schwachen überlagernden Wind überdeckt werden können. Ihre Geschwindigkeit liegt meist unterhalb von 2 m/s (Mosimann et al. 1999). Im Bereich stärkerer Hangneigungen treten im Modellgebiet Kaltluftabflüsse mit Strömungsgeschwindigkeiten von mehr als 3 m/s auf. Die landnutzungstypischen Temperaturunterschiede beginnen sich schon kurz nach Sonnenuntergang herauszubilden und können die ganze Nacht über andauern. Dabei erweisen sich insbesondere Wiesen- und Ackerflächen als kaltluftproduktiv. Abhängig von den Oberflächeneigenschaften und Abkühlungsraten geht damit die rasche Entwicklung von Kaltluftströmungen einher, die zunächst vertikal nur von geringer Mächtigkeit (5-10 m Schichthöhe) sind und sich zwischen der Vielzahl der unterschiedlich temperierten Flächen ausbilden.



Diese kleinskaligen Windsysteme werden im Laufe der Nacht von horizontal und vertikal etwas mächtigeren Flur- und Hangwinden (mehrere Dekameter Mächtigkeit) überdeckt, die zwischen den grossen Freiflächen und überbauten Arealen entstehen. Den hier beschriebenen Phänomenen kommt eine besondere landschaftsplanerische Bedeutung zu: Grössere Siedlungen wirken aufgrund ihrer hohen aerodynamischen Rauigkeit als Strömungshindernis.

Aus diesem Grund sind die Durchlüftung der Stadtkörper und ihr Luftaustausch mit dem Umland generell herabgesetzt. Die Abfuhr von schadstoffbelasteten und überwärmten Luftmassen in den Strassenschluchten kann in Abhängigkeit von der Bebauungsart und -dichte deutlich eingeschränkt sein. Speziell bei austauschschwachen Wetterlagen und für Städte in Muldenlage wirken sich diese Faktoren bioklimatisch ungünstig aus. Daher können die genannten Strömungssysteme durch die Zufuhr frischer und kühlerer Luft eine bedeutende klimaökologische Ausgleichsleistung für die Belastungsräume erbringen.

Die Kaltluftströmung ist in der vorliegenden Untersuchung ein wichtiger Parameter zur Beurteilung des Kaltlufthaushaltes, wobei sich vor allem die Luftaustauschprozesse am Stadtrand erst in der zweiten Nachthälfte vollständig ausgebildet haben. Daher wird im Folgenden auf die Ergebnisse zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens eingegangen.

Das sich zum nächtlichen Analysezeitpunkt ausgeprägte Kaltluftströmungsfeld wird in den Abbildungen in zwei Ebenen dargestellt. Die Strömungsrichtung und Strömungsgeschwindigkeit wird über die Pfeilrichtung und Pfeillänge in Form von Vektoren abgebildet, wobei die Pfeile der Karte für eine übersichtlichere Darstellung in der Klimaanalysekarte auf 100 m x 100 m Kantenlänge (entspricht 200 Rasterzellen) aggregiert werden (Kap. 5).

Die für das 2 m-Niveau berechneten Strömungsgeschwindigkeiten reichen von vollkommener Windstille bis zu Maximalwerten von mehr als 1.5 m/s über den stärker geneigten Hängen im westlichen Stadtgebiet. Die Situation im Bereich Europaplatz/Weissensteinstrasse zeigt Abb. 4.6. Die Kaltluftdynamik wird hier deutlich von Kaltluftabflüssen geprägt, welche sich über den Hangbereichen des Könizbergwalds ausbilden. Im Übergang zur Bebauung treten die gering überbauten Flächenanteile bzw. breiten Strassenräume als Durchlüftungszonen hervor. Vor allem im Bereich Europaplatz sind überdurchschnittlich hohe Strömungsgeschwindigkeiten in Bodennähe zu beobachten (**A**). Dies zeigt sich so auch entlang der Turnierstrasse (**B**). Je nach Ausrichtung können Gebäude als Hindernisse für den Kaltluftstrom wirken. Im dargestellten Ausschnitt der zeichnen sich dahingehend entlang der Weissensteinstrasse mehrere Gebäude ab (**C**). Die senkrecht zur Kaltluftströmung ausgerichtete Bebauung südlich Schlosstrasse erleichtert hingegen das Einwirken der Kaltluft (**D**).

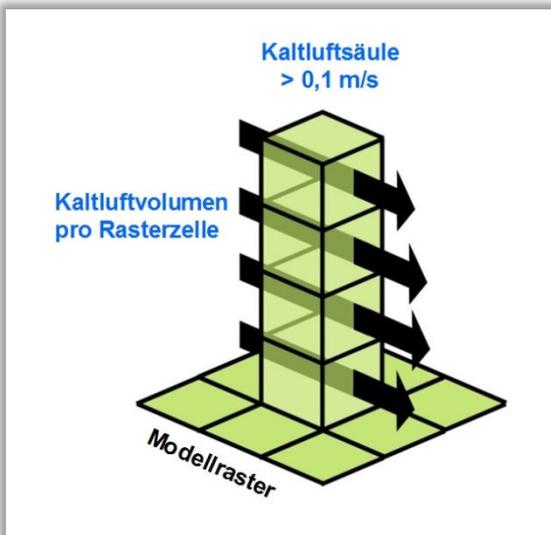


Abb. 4.6: Nächtliches Windfeld Gegenwart im Bereich Europaplatz zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens (2m ü. Grund)

Im Zukunftsszenario für das Jahr 2060 entwickelt sich auch unter dem Einfluss des Klimawandels ein Kaltluftsystem mit sehr ähnlicher Ausprägung wie in der Gegenwart. So liegt 2060 gemäss Modellierung zwar ein insgesamt höheres Temperaturniveau vor. Die relativen Temperaturunterschiede zwischen den Grün- und Freiflächen und den wärmeren Siedlungsräumen bleiben als „Antrieb“ für den Luftaustausch weiterhin bestehen. Es sind hinsichtlich der Einwirktiefe der Kaltluft nur graduelle Unterschiede erkennbar. Das Einwirken von Kaltluft kann von einer zukünftigen Bebauung modifiziert werden und von der gegenwärtigen Situation abweichen.

4.4 Kaltluftvolumenstrom

Wie bereits im Vorkapitel zum autochthonen Windfeld erläutert, kommt den lokalen thermischen Windsystemen eine besondere Bedeutung beim Abbau von Wärme- und Schadstoffbelastungen grösserer Siedlungsräume zu. Weil die potenzielle Ausgleichsleistung einer grünbestimmten Fläche nicht allein aus der Geschwindigkeit der Kaltluftströmung resultiert, sondern zu einem wesentlichen Teil durch ihre Mächtigkeit (d.h. durch die Höhe der Kaltluftschicht) mitbestimmt wird, wird zur Bewertung der Grünflächen ein weiterer Klimaparameter herangezogen: der sogenannte Kaltluftvolumenstrom. Für die Auswertung wurde der Zeitpunkt 4 Uhr morgens gewählt, da zu diesem Zeitpunkt die Intensität der Kaltluftströme voll ausgeprägt ist.



Unter dem Begriff Kaltluftvolumenstrom versteht man, vereinfacht ausgedrückt, das Produkt aus der Fließgeschwindigkeit der Kaltluft, ihrer vertikalen Ausdehnung (Schichthöhe) und der horizontalen Ausdehnung des durchflossenen Querschnitts (Durchflussbreite). Er beschreibt somit diejenige Menge an Kaltluft in der Einheit m^3 , die in jeder Sekunde durch den Querschnitt beispielsweise eines Hanges oder einer Leitbahn fließt. Für die dargestellten Werte bedeutet dies folgendes: Da die Modellergebnisse nicht die Durchströmung eines natürlichen Querschnitts widerspiegeln, sondern den Strömungsdurchgang der gleichbleibenden Rasterzellenbreite, ist der resultierende Parameter streng genommen nicht als Volumenstrom,

Abb. 4.7: Prinzipskizze Kaltluftvolumenstrom

sondern als rasterbasierte Volumenstromdichte aufzufassen. Diesen Wert kann man sich leicht veranschaulichen, indem man sich ein 5 m breites, quer zur Luftströmung hängendes Netz vorstellt, das ausgehend von der Obergrenze der Kaltluftschicht³ bis hinab auf die Erdoberfläche reicht (Abb. 4.7). Bestimmt man nun die Menge der pro Sekunde durch das Netz strömenden Luft, erhält man die rasterbasierte Volumenstromdichte. Der Volumenstrom ist damit ein Mass für den Zustrom von Kaltluft und bestimmt somit, neben der Strömungsgeschwindigkeit, die Grössenordnung des Durchlüftungspotenzials.

STANDARDISIERUNG DES KALTLUFTVOLUMENSTROMS (Z-TRANSFORMATION)

Für die qualitative Bewertung von Klimafaktoren bedarf es eines begründeten, nachvollziehbaren Massstabes. Nicht immer ist ersichtlich, aufgrund welcher Kriterien eine Klassifizierung in Kategorien wie „Hoch“ und „Niedrig“ oder „Günstig“ und „Ungünstig“ erfolgt ist. In der VDI-Richtlinie 3785 Blatt 1 (VDI 2008) wird daher vorgeschlagen, für eine Beurteilung das lokale oder regionale Wertenniveau einer Klimaanalyse zugrunde zu legen und die Abweichung eines Klimaparameters von den mittleren Verhältnissen im Untersuchungsraum als Bewertungsmaßstab heranzuziehen.

Wünschenswert wäre zudem, die Beurteilungskriterien sowohl mit der Ausprägung zusätzlich modellierter Variablen als auch mit den Ergebnissen anderer Untersuchungen vergleichen zu können. Um eine solche Vergleichbarkeit herzustellen, wurde der Parameter Kaltluftvolumenstrom über das Verfahren der z-Transformation standardisiert⁴.

³ Die Schichtgrenze wird dort angesetzt, wo die horizontale Fließgeschwindigkeit nicht höher als 0,1 m/s wird

⁴ Rechnerisch wird dabei von jedem Ausgangswert der Variablen das arithmetische Gebietsmittel abgezogen und durch die Standardabweichung aller Werte geteilt



Bei einer z-Transformation wird das arithmetische Gebietsmittel des Parameters zunächst gleich Null gesetzt, anschliessend werden die Originalmasseinheiten der um dieses Gebietsmittel streuenden Werte in Vielfache der Standardabweichung umgerechnet. Hieraus ergeben sich vier Bewertungskategorien, deren Abgrenzung durch den Mittelwert Null sowie die einfache positive und negative Standardabweichung von diesem Mittelwert festgelegt ist (standardmässig vier Bewertungskategorien durch Mittelwert, obere und untere S1-Schranke; s. Abb. 4.8).

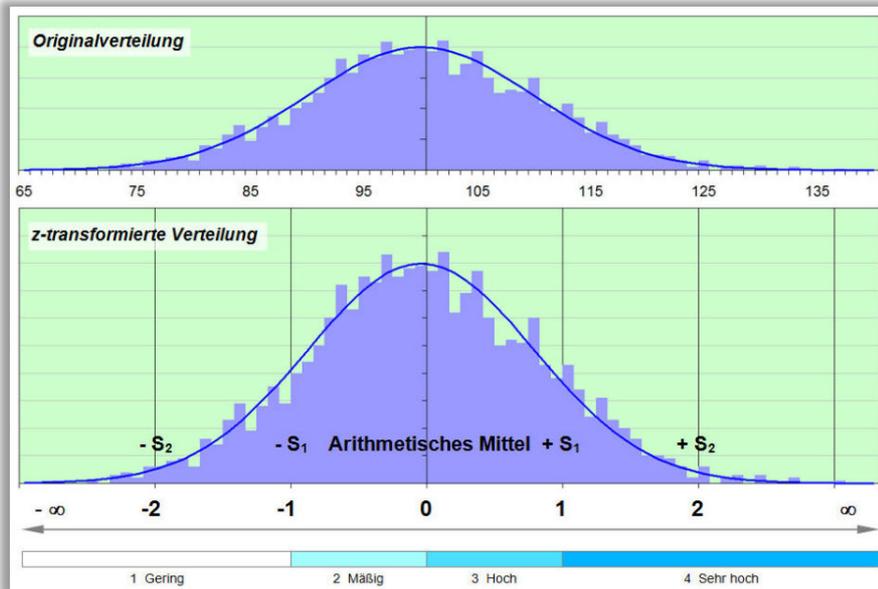


Abb. 4.8: Veranschaulichung der Standardisierung zur vergleichenden Bewertung von Parametern

Die Klassifizierung des flächendeckenden Volumenstroms orientiert sich somit am auftretenden Wertespektrum innerhalb des Stadtgebietes. Die daraus abgeleitete qualitative Bewertung dieser meteorologischen Grösse zeigt Tab. 4.2.

Mittlerer z-Wert	Bewertung	Kaltluftvolumenstrom in m ³ /s um 04:00 Uhr
> 1	Sehr hoch	> 50
> 0 bis 1	Hoch	50 bis ≥ 30
> -1 bis 0	Mässig	30 bis ≥ 5
bis -1	Gering	< 5

Tab. 4.2: Qualitative Einordnung des Kaltluftvolumenstroms

Ausgehend von der gebietstypischen Ausprägung im Untersuchungsraum wird als Schwellenwert für einen klimaökologisch wirksamen Kaltluftstrom ein Wert von mindestens 5 m³/s angenommen, wobei die innenstadtnahen Siedlungsflächen meist einen geringen bis mässigen Volumenstrom aufweisen. Wie auch die anderen Klimaparameter ist der Kaltluftvolumenstrom eine Grösse, die während der Nachtstunden in ihrer Stärke und Richtung veränderlich ist. Die sich im Verlauf der Nacht einstellenden Strömungsgeschwindigkeiten hängen im Wesentlichen von der Temperaturdifferenz der Kaltluft gegenüber der Umgebungsluft, der Hangneigung und der Oberflächenrauigkeit ab – wobei die Kaltluft selber auf alle diese Parameter modifizierend einwirken kann. Gebäude, Mauern oder Strassendämme können als Strömungshindernisse wirken und auf der der Kaltluftströmung zugewandten Seite (Luv) markante Kaltluftstaus auslösen. Werden die Hindernisse von grösseren Luftvolumina über- oder umströmt, kommt es



im vom Wind abgewandten Bereich (Lee) zu bodennahen Geschwindigkeitsreduktionen, die in Verbindung mit vertikalen oder horizontalen Verlagerungen der Strömungsmaxima stehen kann. Die Eindringtiefe von Kaltluft in bebautes Gebiet hängt wesentlich von der Siedlungsgrösse, Bebauungsdichte, anthropogenen Wärmefreisetzung und der Menge einströmender Kaltluft ab. Die räumliche Ausprägung des Kaltluftvolumenstroms im Untersuchungsraum geht im Wesentlichen mit der des bodennahen Strömungsfeldes einher.

Gegenwärtige Situation

Abbildung 4.9 zeigt den Kaltluftvolumenstrom für das Simulationsgebiet in einer qualitativen und quantitativen Abstufung. Die intensivsten Kaltluftabflüsse sind ausserhalb des Stadtgebietes Bern zu beobachten (A). Analog zur Strömungsgeschwindigkeit treten die höchsten Werte meist über den mit Rasen bewachsenen und gut überströmbaren Hangbereichen auf. Ein hohes Wertenniveau kann allerdings auch im westlichen Stadtgebiet beobachtet werden (B). Darüber hinaus dominiert ein mässiger Volumenstrom. Lediglich Teilbereiche wie der Bremgartenwald weisen einen geringen Kaltluftvolumenstrom auf (C). Dies ist einerseits auf die relativ ebene Reliefsituation zurückzuführen, bei der nur im geringen Masse Kaltluftabflüsse mit signifikanten Volumina auftreten. Andererseits stellt der Stammraum eine Hinderniswirkung für die bodennahe Kaltluftströmung dar.

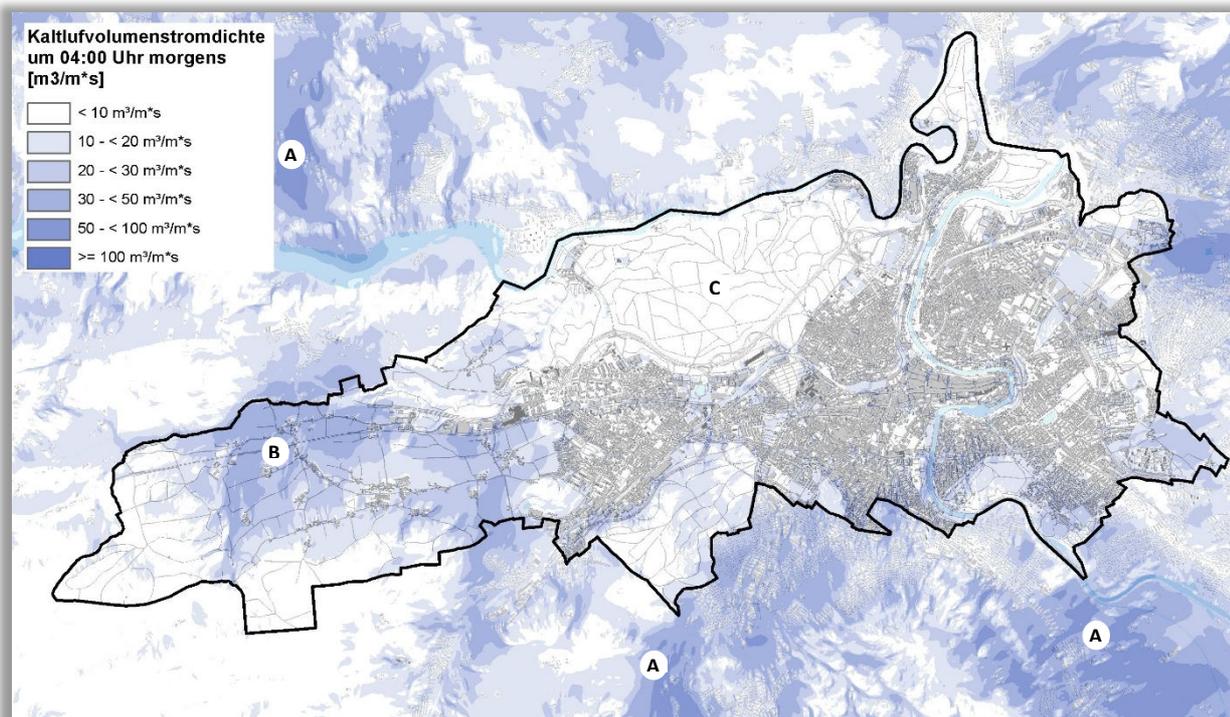


Abb. 4.9: Kaltluftvolumenstrom Gegenwart im Modellgebiet zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens

Der in Abb. 4.10 dargestellte Ausschnitt weist im Umfeld der Kernstadt einen nahezu flächendeckenden mittleren Volumenstrom auf. Das Aaretal wird in den Nachtstunden mit von den angrenzenden Hängen abfliessender Kaltluft „aufgefüllt“, wobei hohe Werte vor allem im Aaretal südlich der Altstadt (D) sowie darüber südlich Europaplatz auftreten (E). Im Bereich der stark überwärmten Altstadt wird die einwirkende Kaltluft stellenweise durch die Bebauung kanalisiert. Entsprechend sind auch Waisenhaus-, Kornhaus- und Casinoplatz von stellenweise hohen Volumenströmen gekennzeichnet (F). Dagegen liegt in Teilen von



Länggasse und Muesmatt lokal ein geringer Kaltluftvolumenstrom vor (G), was neben der vergleichsweise ebenen Geländesituation vor allem in der dichten Bebauung begründet liegt.

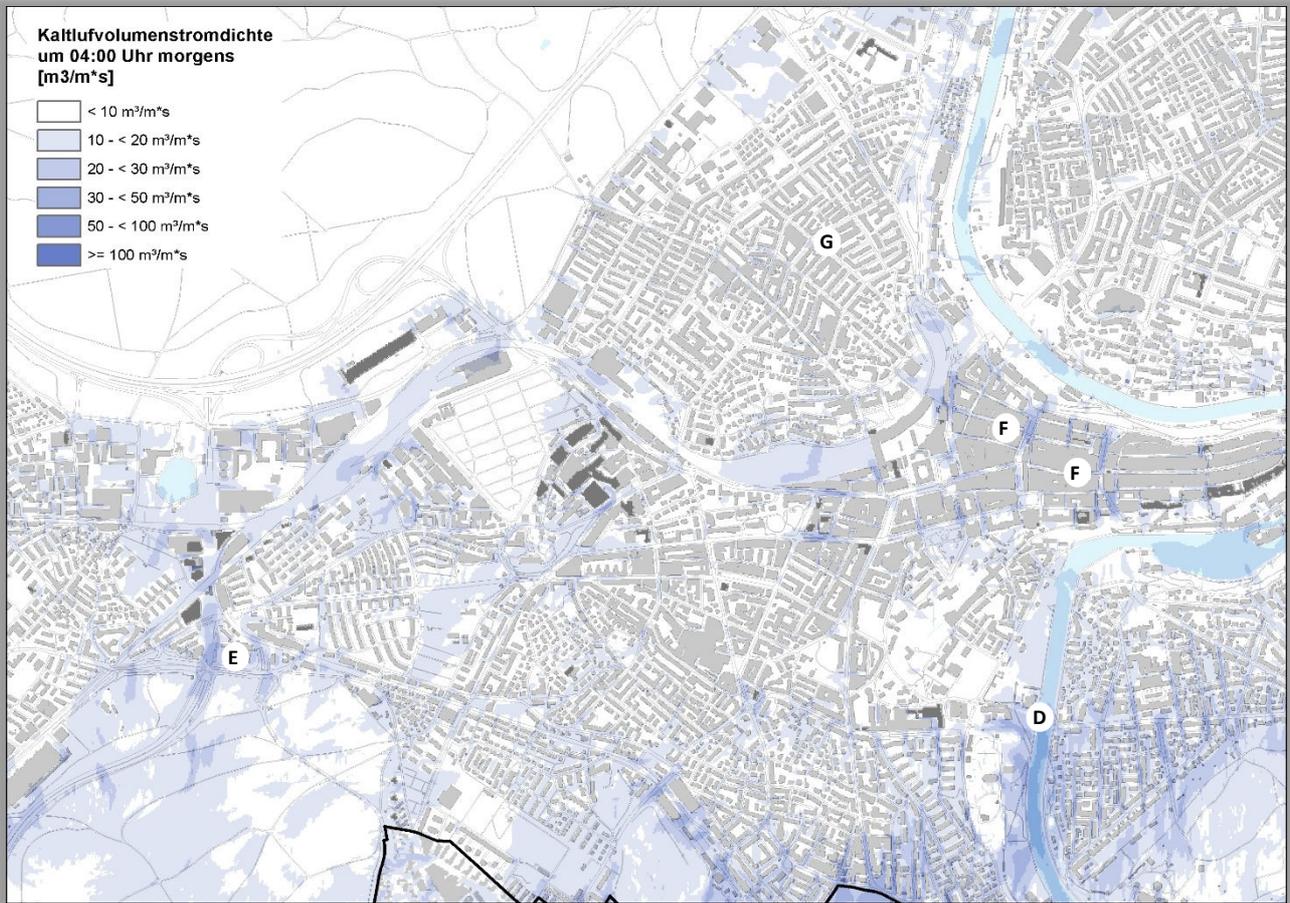


Abb. 4.10: Kaltluftvolumenstrom Gegenwart zum Zeitpunkt 4 Uhr morgens

Im Laufe einer (autochthonen) Sommernacht steigt die Kaltluftmächtigkeit i.d.R. an, sodass geringe Hindernisse überwunden werden können. Beispielsweise können einzelne Grünflächen, die zwar nicht zusammenhängen, aber räumlich nahe liegen und durch nur wenige Hindernisse getrennt sind, als „Trittsteine“ für Kaltluft dienen. Folglich können die in das Siedlungsgebiet reichenden Kaltluftvolumenströme ausgeprägter sein als die bodennahen Windgeschwindigkeiten in der Darstellung des Kaltluftströmungsfeldes.

Zukunftsszenario

Im Zukunftsszenario 2060 bleibt der Kaltluftvolumenstrom auch unter dem Einfluss des zu erwartenden Klimawandels in seiner räumlichen Ausprägung und Intensität erhalten. Dies ist darauf zurückzuführen, dass das allgemeine Temperaturniveau zwar ansteigt, die relativen Temperaturunterschiede zwischen Grünflächen und Bebauung jedoch als „Antrieb“ für den Luftaustausch auch weiterhin vorhanden bleiben. Die im Raum Bern vorgesehenen Entwicklungsflächen führen im Wesentlichen nur zu einer kleinräumigen Beeinflussung der Durchlüftungssituation am Ort einer Nutzungsänderung (Abb. 4.11). Die als perspektivischer Möglichkeitsräume für eine bauliche Entwicklung betrachteten Fläche führen im Übergang zum Könizbergwald voraussichtlich zu einer lokalen Abschwächung des Kaltluftvolumens (H).

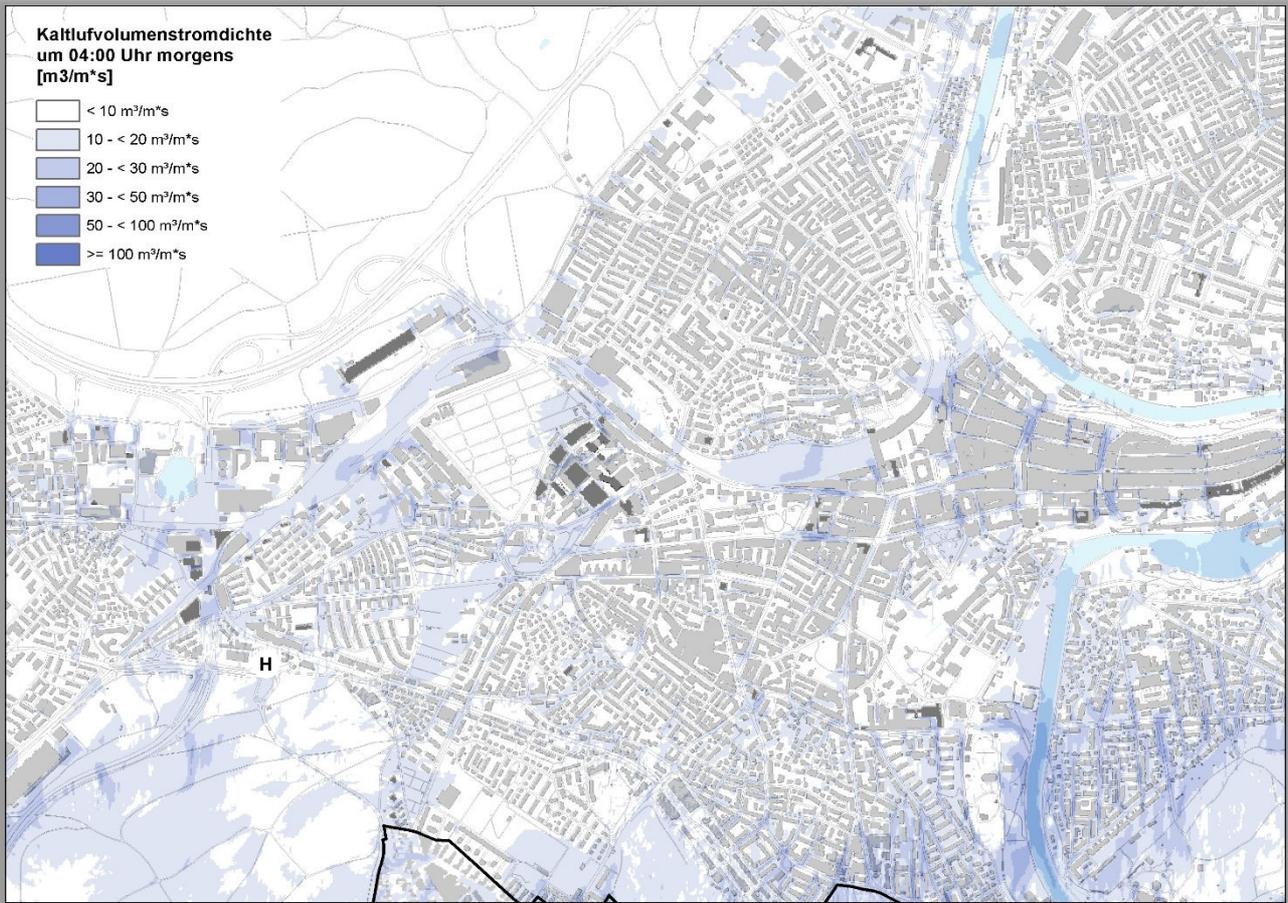


Abb. 4.11: Kaltluftvolumenstrom Zukunftsszenario zum Zeitpunkt 4 Uhr



5 Klimaanalysekarte

Der Ausarbeitung der klimaökologisch relevanten Strukturen liegt die vorangegangene Klimamodellierung für das Stadtgebiet Bern zugrunde. Darin wurden die relevanten meteorologischen Parameter wie Temperaturfeld, Kaltluftvolumenstrom und autochthones Strömungsfeld modelliert und in ihrer flächenhaften Ausprägung dargelegt. Ausgangspunkt der vorliegenden Analyse ist nun die Gliederung des Untersuchungsraumes in bioklimatisch und/oder lufthygienisch belastete Siedlungsräume (Wirkungsraum) einerseits und Kaltluft produzierende, unbebaute und vegetationsgeprägte Flächen andererseits (Ausgleichsräume). Sofern diese Räume nicht unmittelbar aneinandergrenzen und die Luftaustauschprozesse stark genug ausgeprägt sind, können linear ausgerichtete, gering überbaute Freiflächen (Luftleitbahnen) beide miteinander verbinden. Aus der Abgrenzung von Gunst- und Ungunsträumen sowie der verbindenden Strukturen ergibt sich somit ein komplexes Bild vom Prozesssystem der Luftaustauschströmungen des Ausgleichsraum-Wirkungsraum-Gefüges innerhalb des Stadtgebietes. Eine wichtige Information stellt der Wärmeinseleffekt in den Siedlungsflächen dar, welcher in der Klimaanalysekarte für den unbebauten Aussenraum dargestellt wird. Dabei zeigt sich deutlich der Einfluss der Bodenbedeckung auf die Temperatursituation.

KALTLUFT

Windvektoren in 2 m über Grund

Die bodennahe Temperaturverteilung bedingt horizontale Luftdruckunterschiede, die wiederum Auslöser für lokale thermische Windsysteme sind. Ausgangspunkt dieses Prozesses sind die nächtlichen Temperaturunterschiede, die sich zwischen Siedlungsräumen und vegetationsgeprägten Freiflächen einstellen. An den geneigten Flächen setzt sich abgekühlte und damit schwerere Luft in Richtung zur tiefsten Stelle des Geländes als Kaltluftabfluss in Bewegung. Das sich zum nächtlichen Analysezeitpunkt 4 Uhr ausgeprägte Kaltluftströmungsfeld wird über eine Pfeilsignatur dargestellt.

Prozessräume

Die Prozessräume kennzeichnen die Bereiche mit einheitlichem Abflussgeschehen nach dem Wasserscheidenprinzip als Kaltlufteinzugsgebiete. Sie sind das Ergebnis einer GIS-basierten Reliefanalyse nach KING (1973).

Kaltlufteinwirkungsbereich innerhalb der Bebauung

Diese Schraffur kennzeichnet alle Siedlungsflächen, welche sich im „Einwirkungsbereich“ eines klimatisch wirksamen Kaltluftstroms befinden. Zur Abgrenzung wird eine bodennahe Windgeschwindigkeit von mindestens 0,2 m/s und ein klimatisch wirksamer Kaltluftvolumenstrom $> 5 \text{ m}^3/\text{s}$ pro Rasterzelle herangezogen.

Kaltluftentstehungsflächen mit hoher und sehr hoher Kaltluftproduktion

Innerhalb der Grün- und Freiflächen werden die Teilareale mit hoher/sehr hoher Kaltluftproduktion hervorgehoben. Dabei handelt es sich um die rasterhaft modellierten Werte mit einer stündlichen Kaltluftproduktion von mehr als $10 \text{ m}^3 \text{ pro m}^2$. Dabei erweisen sich vor allem die Waldflächen mit stärkeren Hangneigungen als besonders kaltluftproduktiv, da die im Kronendach gebildete Kaltluft hangabwärts strömt anstatt im Bestand „einzusinken“.

KALTLUFTLIEFERUNG DER GRÜN- UND FREIFLÄCHEN

Für die Kaltluftentstehungsflächen wird der rasterhaft berechnete Kaltluftvolumenstrom (vgl. Kap. 4.4) in einer quantitativen Abstufung dargestellt. Somit wird die räumliche Ausprägung und die Identifikation von Teilflächen mit besonders hohen Werten gut sichtbar.



WÄRMEINSELEFFKT IM SIEDLUNGSGEBIET

Basierend auf den modellierten bodennahen Lufttemperaturen wird der Wärmeinseleffekt über die Abweichung vom Temperaturmittel der Grün- und Freiflächen berechnet. Dargestellt wird dies für alle Rasterzellen (exklusive der Gebäude), welche sich innerhalb einer Siedlungsfläche entsprechend der Basisgeometrien befinden.

Einen Ausschnitt aus der Klimaanalysekarte zeigt Abb. 5.1. Das im Kap. 4.3 beschriebene Kaltluftströmungsfeld wird über die Pfeilsignatur wiedergegeben. Wobei je nach den örtlichen Gegebenheiten die Reliefbedingungen auch die Abflussrichtung der Kaltluft bestimmen.

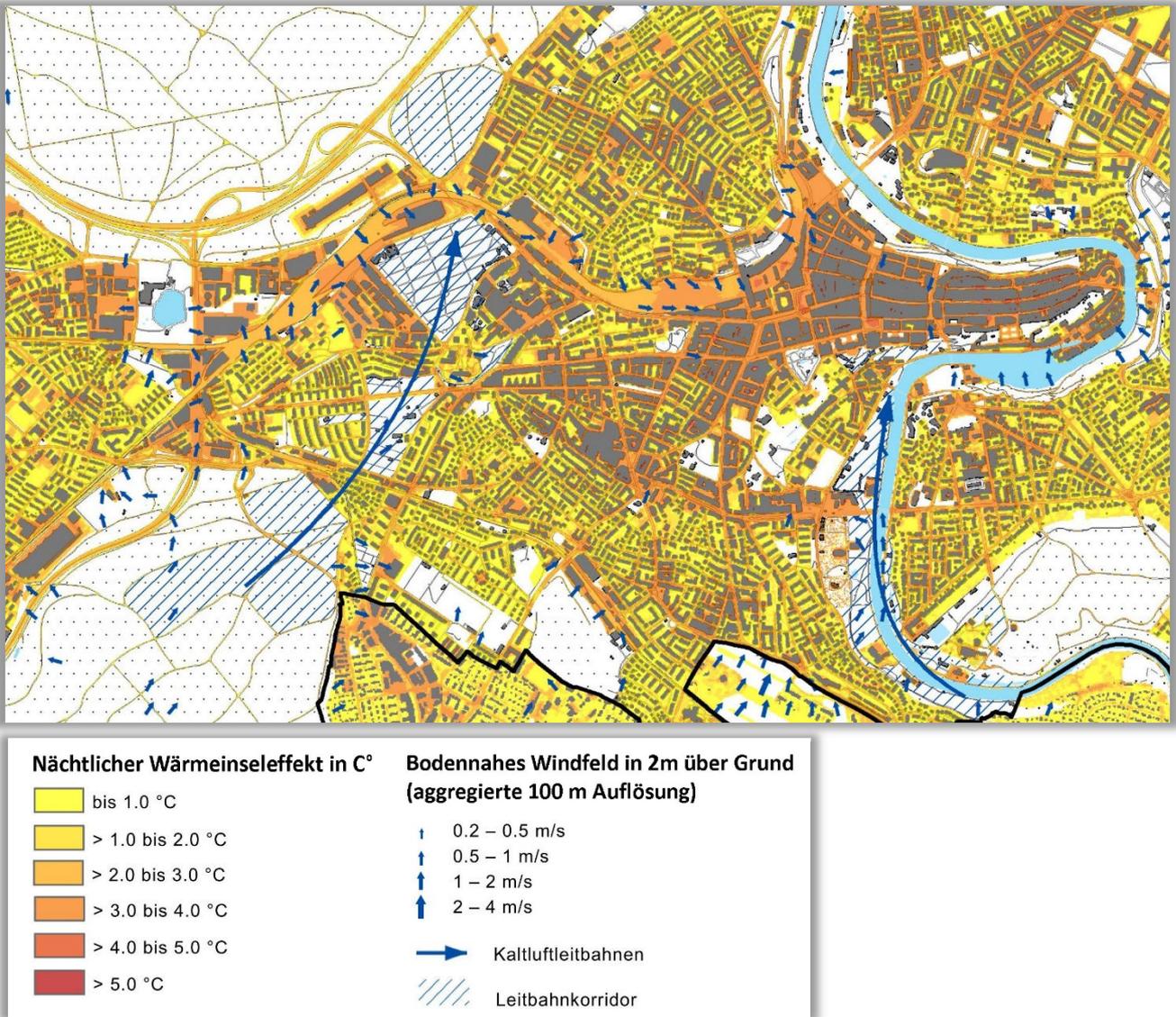


Abb. 5.1: Klimaanalysekarte Gegenwart

In Bern weisen vor allem die mit Wald bestandenen Hangbereiche eine intensive Kaltluftentstehung auf, wobei einige sich anschliessende Tiefenlinien bzw. Grünachsen auch als Kaltluftleitbahnen einzuordnen sind. Im Stadtteil Mattenhof-Weissenbühl zeichnet sich der Grünflächenverbund Könizbergwald/Areal Schloss Holligen/Friedbühlanlage dahingehend ab. Im Bereich der unteren Altstadt führt das Aaretal Kaltluft in Richtung der Stadtmitte heran. Die sich innerhalb einer Leitbahn befindlichen Grünareale werden als Leitbahnkorridor mit einer Schraffur gekennzeichnet.

Die in Kap. 4.1 beschriebene nächtliche Temperatursituation zeichnet sich auch im städtischen Wärmeinseleffekt ab. Die Beschreibung von Temperaturdifferenzen in der Wissenschaft erfolgt üblicherweise in der Einheit Kelvin (K) und können mit °C gleichgesetzt werden. Während die gering bis moderat verdichteten Siedlungsflächen eine eher niedrige



Überwärmung bis 2 K gegenüber den Grün- und Freiflächen aufweisen, steigt sie mit zunehmender städtebaulicher Dichte an und beträgt mehr als 4 K im Innenstadtbereich Bern sowie den grösseren Gewerbeflächen. In den Stadtteilkernen treten lokal Werte von bis zu 2 K auf.

Die Situation für das Zukunftsszenario zeigt Abb. 5.2, wobei sich das insgesamt höhere Temperaturniveau auch im Wärmeinseleffekt widerspiegelt. Dies ist vor allem in den urban geprägten Siedlungsflächen der Fall, wo die Zunahme gegenüber heute mehr als 2,6 K betragen kann. In den durchgrüneten Siedlungstypologien des Berner Stadtgebietes ist die Zunahme dagegen schwächer ausgeprägt. Das Kaltluftsystem wird demgegenüber hinsichtlich räumlicher Ausprägung und Intensität etwa der Situation von heute entsprechen.

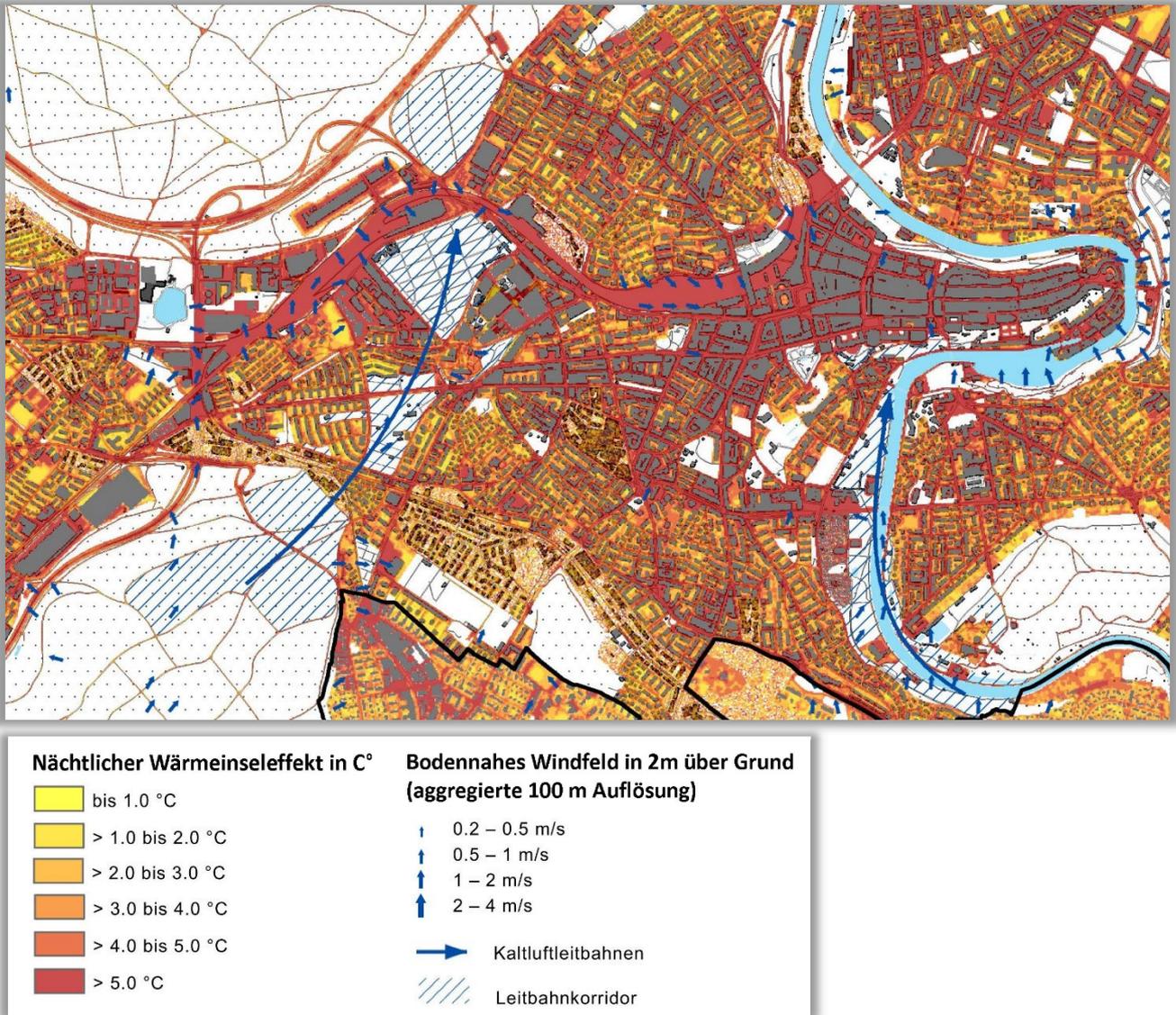


Abb. 5.2: Klimaanalysekarte Zukunftsszenario 2060



6 Planungshinweiskarte Tagsituation

Innerstädtische und siedlungsnahe Grünflächen haben eine wesentliche Wirkung auf das Stadt-/Siedlungsklima und beeinflussen die direkte Umgebung in mikroklimatischer Sicht positiv. Die Planungshinweiskarten Stadtklima stellen eine integrierende Bewertung der modellierten Klimaparameter im Hinblick auf planungsrelevante Belange dar. Aus ihnen lassen sich Schutz- und Entwicklungsmaßnahmen zur Verbesserung von Klima und - über die Effekte der Verdünnung und des Abtransportes - auch der Luft ableiten. Dem Leitgedanken dieser Bemühungen entsprechen die Ziele zur

- Sicherung,
- Entwicklung und
- Wiederherstellung

klimaökologisch wichtiger Oberflächenstrukturen. Die zugeordneten Planungshinweise geben Auskunft über die Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsänderungen, aus denen sich klimatisch begründete Anforderungen und Massnahmen im Rahmen der räumlichen Planung ableiten lassen.

Es wurde für die Gegenwart, also das Jahr 2020 und das Zukunftsszenario 2060 jeweils eine separate Karte für die Tagsituation erstellt, die sich jeweils auf das Stadtgebiet Bern beziehen. Ausgehend von ihren Bewertungen werden den Flächen allgemeine Planungshinweise zugeschrieben. Diese sind nicht rechtsverbindlich und stellen Empfehlungen aus klimatischer Sicht dar, welche je nach örtlichen Gegebenheiten und rechtlichen Anforderungen (z.B. mit Blick auf den Denkmalschutz) umgesetzt werden können. Planungshinweise für die Nachtsituation werden Bestandteil einer separaten Analyse sein, welche auf den vorliegenden Simulationsergebnissen beruhen wird. Zum Zeitpunkt der Fertigstellung dieses Berichts (Mai 2023) sind die Arbeiten dazu noch nicht abgeschlossen.

6.1 Bewertung der Tagsituation

Zur Bewertung der Tagsituation wird der humanbioklimatische Index PET um 14:00 Uhr herangezogen (vgl. Kap. 4.2). Für die PET existiert in der VDI-Richtlinie 3787, Blatt 9 eine absolute Bewertungsskala, die das thermische Empfinden und die physiologischen Belastungsstufen quantifizieren (vgl. Tab. 6.1). Die Bewertung der thermischen Belastung im Stadtgebiet Bern orientiert sich daran. Da die Kategorien jeweils eine Wertespanne von mehreren °C abdecken, ist zur besseren Darstellung der Belastungssituation im bebauten Siedlungsraum eine weitere Kategorie hinzugefügt worden. Diese umfasst den Temperaturbereich 38 °C bis 41 °C (als „sehr starke Wärmebelastung“) und führt zu einer besseren Differenzierung der Belastungssituation vor allem im urbanen Gebiet. Diese Klassifizierung wird auch für die Verkehrsflächen angewendet. Somit können die Strassenabschnitte mit starker Wärmebelastung und prioritärem Bedarf an Massnahmen zur Hitzeminderung identifiziert werden. Um eine homogene Klassenbildung bei der Bewertung zu gewährleisten, gilt dies auch für die Gleisanlagen. Die Wertausprägung in den Grün- und Freiflächen machte diese zusätzliche Kategorie hingegen nicht notwendig.



PET	Thermisches Empfinden	Physiologische Belastungsstufe
4 °C	Sehr kalt	Extreme Kältebelastung
8 °C	Kalt	Starke Kältebelastung
13 °C	Kühl	Mässige Kältebelastung
18 °C	Leicht kühl	Schwäche Kältebelastung
20 °C	Behaglich	Keine Wärmebelastung
23 °C	Leicht warm	Schwache Wärmebelastung
29 °C	Warm	Mässige Wärmebelastung
35 °C	Heiss	Starke Wärmebelastung
38°C	<i>Heiss</i>	<i>Sehr starke Wärmebelastung</i>
41 °C	Sehr heiss	Extreme Wärmebelastung

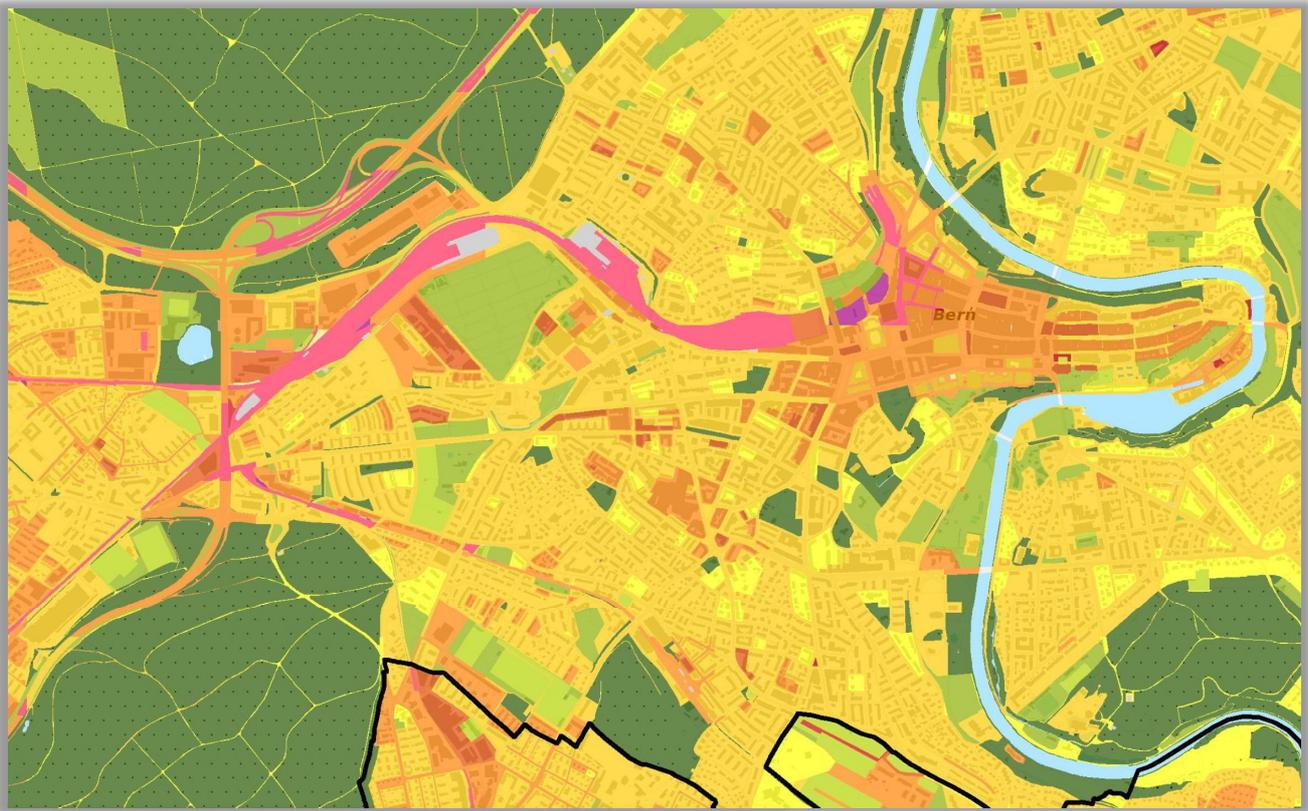
Tab. 6.1: Zuordnung von Schwellenwerten für den Bewertungsindex PET während der Tagesstunden

Die Zuweisung der Aufenthaltsqualität von Grün- und Freiflächen in der Planungshinweiskarte beruht auf der jeweiligen physiologischen Belastungsstufe. So liegt eine hohe Aufenthaltsqualität bei einer schwachen oder nicht vorhandenen Wärmebelastung vor, während eine starke oder extreme Wärmebelastung zu einer geringen bzw. sehr geringen Aufenthaltsqualität führt. Die bioklimatische Bewertung am Tage ist ein Mass für die Aufenthaltsqualität in den Siedlungsflächen ausserhalb von Gebäuden sowie in Grün- und Freiflächen. Diese beeinflusst auch die Situation innerhalb der Gebäude, doch hängt das Innenraumklima von vielen weiteren (z.B. gebäudebezogenen) Faktoren ab. Diese Zusammenhänge können im Rahmen der vorliegenden Arbeit allerdings nicht weiter vertieft werden.

6.2 Ergebnis Tagsituation

Am Tage sind gegenwärtig deutliche Unterschiede in der Aufenthaltsqualität sowohl in den bebauten bzw. versiegelten Bereichen als auch den Grünflächen zu erkennen (Abb. 6.1). **Urbane Siedlungsflächen** lassen mehrheitlich eine mässige Belastung erkennen (68,6 %), was auf einen hohen Grünanteil in einem Grossteil der Bebauung zurückzuführen ist. Eine starke und sehr starke bioklimatische Belastung liegt auf 17,2 % bzw. 5,3 % der Fläche vor. Dies ist vor allem auf Gewerbeflächen der Fall, welche oftmals grosse versiegelte Areale aufweisen und in der Regel wenige Grünflächen und eher niedrigere Gebäude aufweisen, sodass die Einstrahlung und entsprechend die thermische Belastung am Tage höher ausfällt. Auf lediglich 0,1 % der Fläche ist eine extreme Belastung anzutreffen. Eine schwache Belastung ist mit einem Anteil von 8,8 % in den eher peripheren Siedlungsflächen mit höherem Anteil schattenspendender Grünstrukturen zu beobachten. Vor allem im Nahbereich zu grösseren Waldflächen zeigt sich die positive Wirkung grösserer Baumbestände für die angrenzende Bebauung.

Verkehrsflächen weisen aufgrund ihrer nahezu vollständigen Versiegelung insgesamt höhere thermische Belastungen auf, wobei ihr Flächenanteil mit extremer Belastung 0,7 % beträgt und daher sehr gering ist (Tab. 6.5). Bei diesem Flächentyp liegt generell eine grosse Bandbreite struktureller Ausprägungen vor - von offenen, vollversiegelten Plätzen bis hin zu durch Bäume (oder Gebäude) stark verschatteten Strassenabschnitten.



Bioklimatische Belastungssituation in Siedlungsflächen, 2 m über Grund am Tag

-  schwache Belastung
-  mässige Belastung
-  starke Belastung
-  sehr starke Belastung
-  extreme Belastung
- 

Aufenthaltsqualität der Grün- und Freiflächen am Tag

-  Hoch
-  Mässig
-  Gering
-  Sehr gering

Abb. 6.1: Planungshinweiskarte Tagsituation Gegenwart



Belastungssituation	Flächenanteil (%)		Allgemeine Planungshinweise
	Siedlungsraum	Verkehrsflächen	
Schwach	8,8	9,4	Es liegen überwiegend bioklimatisch günstige Bedingungen vor, die es zu erhalten gilt. Der Grünanteil ist als ausreichend einzustufen. Massnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind nicht erforderlich, sollten aber bei wichtigen Fuss- Velowegen sowie Plätzen geprüft werden.
Mässig	68,6	50,6	Massnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation werden empfohlen, z.B. in Form von Verschattungselementen bzw. zusätzlicher Begrünung. Dies gilt auch für Flächen des fliessenden und ruhenden Verkehrs (insb. Fuss- und Velowege; Parkplätze) sowie Stadtplätze. Ausgleichsräume sollten zu Fuss erreichbar und zugänglich sein.
Stark	17,2	23,2	Massnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind anzuraten. Hoher Bedarf an Anpassungsmassnahmen wie zusätzlicher Begrünung und Verschattung sowie ggf. Entsiegelung. Dies gilt auch für Flächen des fliessenden und ruhenden Verkehrs (insb. Fuss- und Velowege, Parkplätze sowie Plätze). Ausreichend Ausgleichsräume sollten zu Fuss gut erreichbar und zugänglich sein.
Sehr stark	5,3	16,1	Massnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind in den betroffenen Bereichen dringend anzuraten. Sehr hoher Bedarf an Anpassungsmassnahmen wie bspw. zusätzlicher Begrünung (z.B. Pocket-Parks), Verschattung und Entsiegelung. Dies gilt auch für Flächen des fliessenden und ruhenden Verkehrs (insb. Fuss- und Velowege sowie Plätze). Ausreichend Ausgleichsräume sollten in kurzer Distanz erreichbar und zugänglich sein.
Extrem	0,1	0,7	Massnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind in den betroffenen Bereichen dringend anzuraten. Sehr hoher Bedarf an Anpassungsmassnahmen wie bspw. zusätzlicher Begrünung (z.B. Pocket-Parks), Verschattung und Entsiegelung. Dies gilt auch für Flächen des fliessenden und ruhenden Verkehrs (insb. Fuss- und Velowege sowie Plätze). Ausreichend Ausgleichsräume sollten in kurzer Distanz erreichbar und zugänglich sein.

Tab. 6.5: Gegenwärtige Bioklimatische Belastungssituation am Tage, deren Flächenanteile und abgeleitete allgemeine Planungshinweise

Wie bei den Siedlungsflächen dominiert mit 50,6 % auch in den Verkehrsflächen eine mässige Belastungssituation. Sie weisen mit 9,4 % einen ähnlichen Flächenanteil mit schwacher Belastung auf wie die Siedlungsareale.

Bei den **Grünflächen** weisen gemäss Tab.6.6 57,1 % eine hohe Aufenthaltsqualität mit geringer PET auf, d.h. sie bieten an Sommertagen eine hohe Aufenthaltsqualität und eignen sich je nach Lage als (potenzielle) Rückzugsorte und Aufenthaltsbereiche für die Bevölkerung. Dabei handelt es sich vor allem um Waldflächen sowie Parkanlagen mit ausgeprägtem Baumbestand. Die landwirtschaftliche genutzten Flächen im Stadtgebiet eignen sich aufgrund der meist ungehinderten Einstrahlung (unabhängig von der ohnehin fehlenden Zugänglichkeit) nicht als Rückzugsort und tragen zu einem hohen Anteil an Grünflächen mit geringer bzw. sehr geringer Bedeutung für die Aufenthaltsqualität (29.1 % bzw. 3.9 %) bei.



Aufenthaltsqualität der Grünflächen	Flächenanteil (%)	Allgemeine Planungshinweise
Hoch	57.1	Grünflächen mit einem hohen Mass an Verschattung und damit einhergehender hoher Aufenthaltsqualität, die zu Fuss aus den hitzebelasteten Siedlungsgebieten heraus gut erreicht werden können. Verschattende Vegetationselemente sind zu erhalten und zu schützen (ggf. Bewässerung). Eine gute Erreichbarkeit soll gewährleistet sein bleiben.
Mässig	9.9	Grünflächen mit einem durchschnittlichen Mass an Verschattung, bei denen der bioklimatisch positive Einfluss durch Vegetationselemente überwiegt. Verschattende Vegetationselemente sollen ggf. mit Hilfe von Bewässerung erhalten und da, wo möglich sinnvoll, ausgebaut werden. Das gleiche gilt im Fall von siedlungsfernen Grünflächen mit hoher Verschattung, die nicht erreicht werden, aber als Aufenthaltsbereiche am Tage dienen können.
Gering	29.1	Frei- und Grünflächen mit einem Defizit an Verschattung (geringe Ausgleichsfunktion). Eher schlechte Eignung als Aufenthaltsbereich. Innerhalb des Siedlungsgebiets wird angeraten, verschattende Vegetationselemente vorzusehen bzw. auszubauen (Erhöhung der Mikroklimavielfalt).
Sehr gering	3.9	Freiflächen bzw. siedlungsferne Grünflächen mit wenig Schatten und intensiver solarer Einstrahlung (vorwiegend Rasen- bzw. landwirtschaftliche Nutzflächen). Innerhalb des Siedlungsgebiets wird dringend angeraten, verschattende Vegetationselemente vorzusehen bzw. auszubauen (Erhöhung der Mikroklimavielfalt, dient zugleich der ökologischen Vernetzung und erhöhter Biodiversität)).

Tab. 6.6: Gegenwärtige Flächenanteile der Aufenthaltsqualität von Grünarealen am Tage und abgeleitete allgemeine Planungshinweise

Wie sich im Ausschnitt aus der Karte (2020) für die Tagsituation in Abb. 6.1 zeigt, treten die nicht mit Bäumen verschatteten Strassenbereiche mit einer sehr starken Belastung hervor. In der westlichen Altstadt sowie in Gewerbeflächen mit starker Oberflächenversiegelung tritt eine starke bis sehr starke Belastung auf. In weiten Teilen des Stadtgebietes liegt hingegen vorwiegend nur eine mässige Hitzebelastung vor, was im Wesentlichen auf den hohen Grünanteil der Bebauung zurückzuführen ist. Auch die übrigen peripheren Siedlungsflächen mit ausgeprägtem Baumbestand weisen ebenfalls eine mässige Belastungssituation auf.

In zahlreichen Grünflächen können Bäume durch ihren Schattenwurf für ein angenehmeres Aufenthaltsklima sorgen, da dieser den Strahlungseinfluss deutlich vermindert. Im Weiteren treten sowohl grössere (z.B. Dählhölzliwald) als auch kleinere Grünareale (z.B. kleine Schanze) mit hoher Aufenthaltsqualität hervor. Eine Bilanzierung der Flächenanteile für die Tagsituation zeigt Abb. 6.2.

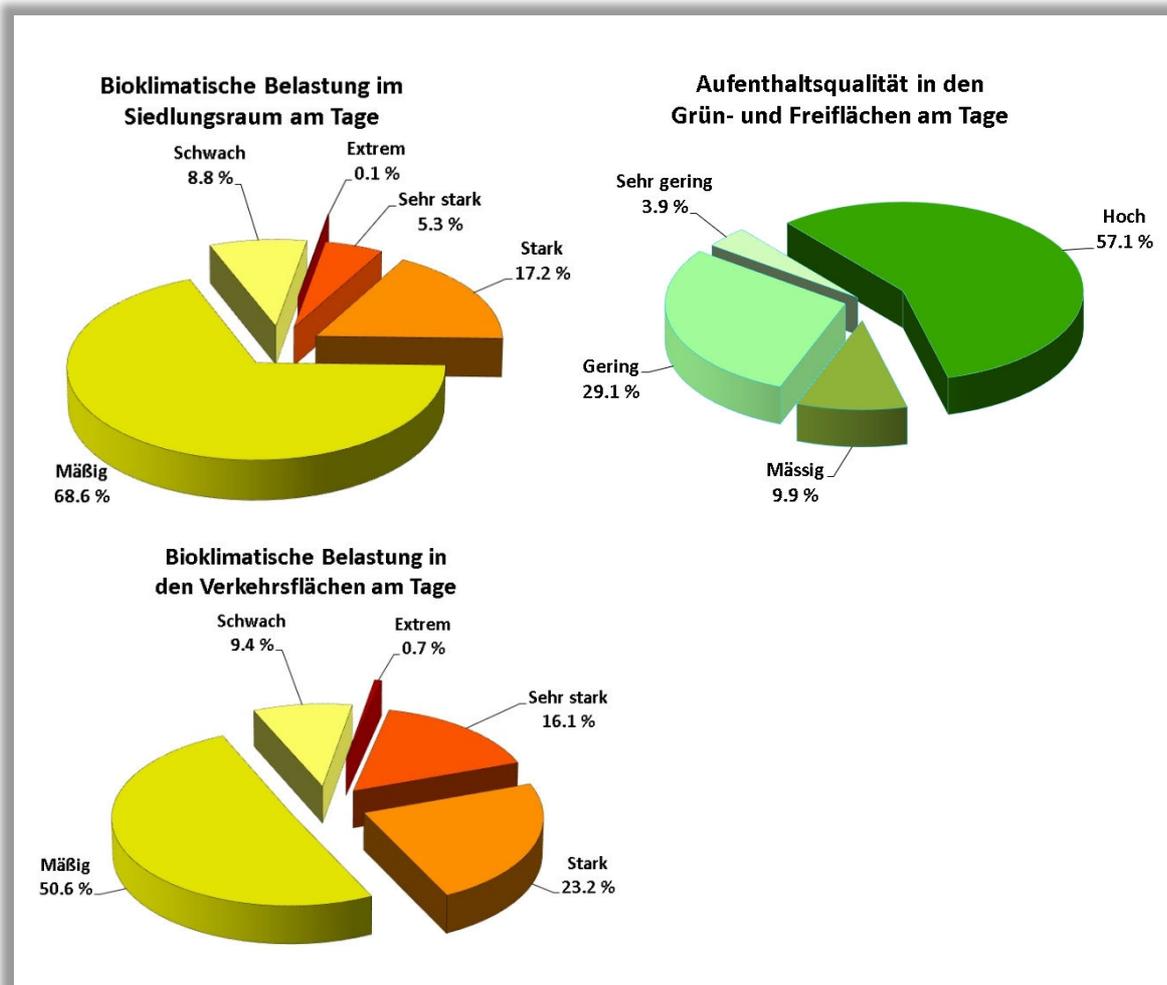


Abb. 6.2: Flächenanteile der bewerteten Nutzungsstrukturen im Stadtgebiet Bern (Tagsituation) - Gegenwart

Der unter dem Einfluss des Klimawandels zu erwartende Anstieg der sommerlichen Wärmebelastung führt in zahlreichen Siedlungs- und Grünflächen zur Einordnung in eine stärkere Belastungskategorie (Abb. 6.3). So weist im Bezugsjahr 2060 4,6 % der Bebauung gegenüber nur 0,1 % in 2020 eine extreme sommerliche Wärmebelastung im unbebauten Aussenraum auf. Der Anteil sehr starker Belastung verdreifacht sich von 5,3 % auf 14,5 %. Dies verdeutlicht die Relevanz von Massnahmen zur Hitzeanpassung sowohl im unbebauten Aussenraum der Siedlungsflächen als auch an den Gebäuden selbst.

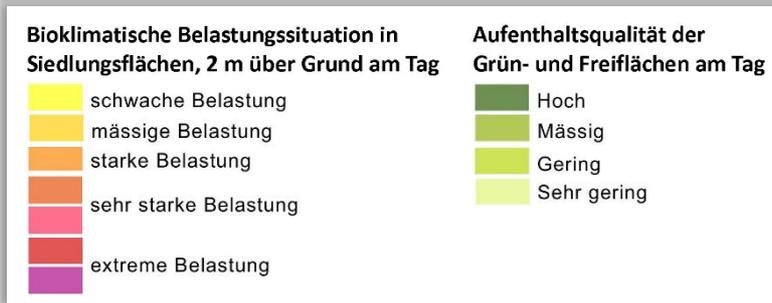
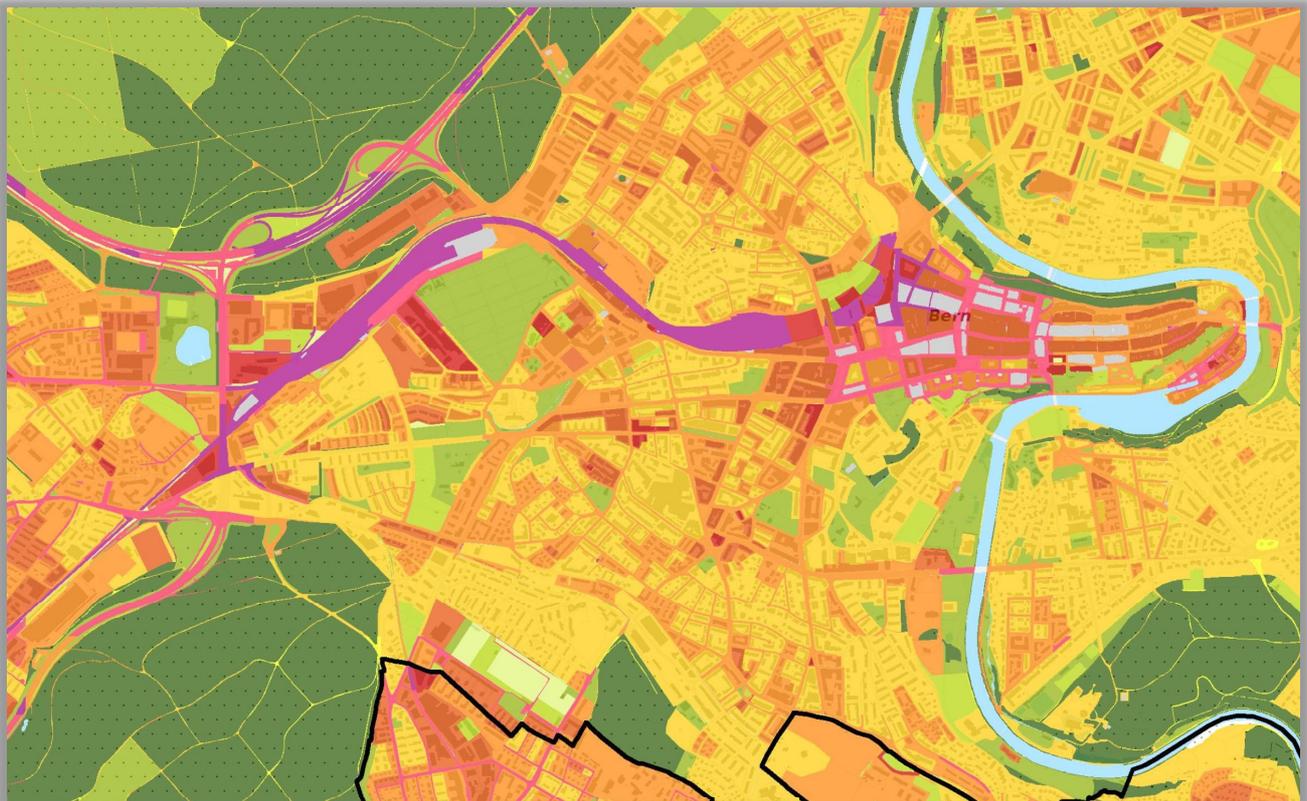


Abb. 6.3: Planungshinweiskarte Tagsituation Zukunftsszenario 2060

Eine Verschiebung der Flächenanteile in eine Kategorie mit höherer Belastung zeichnet sich auch für die Grünflächen ab. Während gegenwärtig in ca. 4 % der Grünflächen eine sehr geringe Aufenthaltsqualität anzutreffen ist, wird dies zukünftig bei ca. 26 % der Fall sein (Abb. 6.4). Somit sind auch für die Grünflächen Massnahmen zum Erhalt bzw. zur Verbesserung der Aufenthaltsqualität geboten.

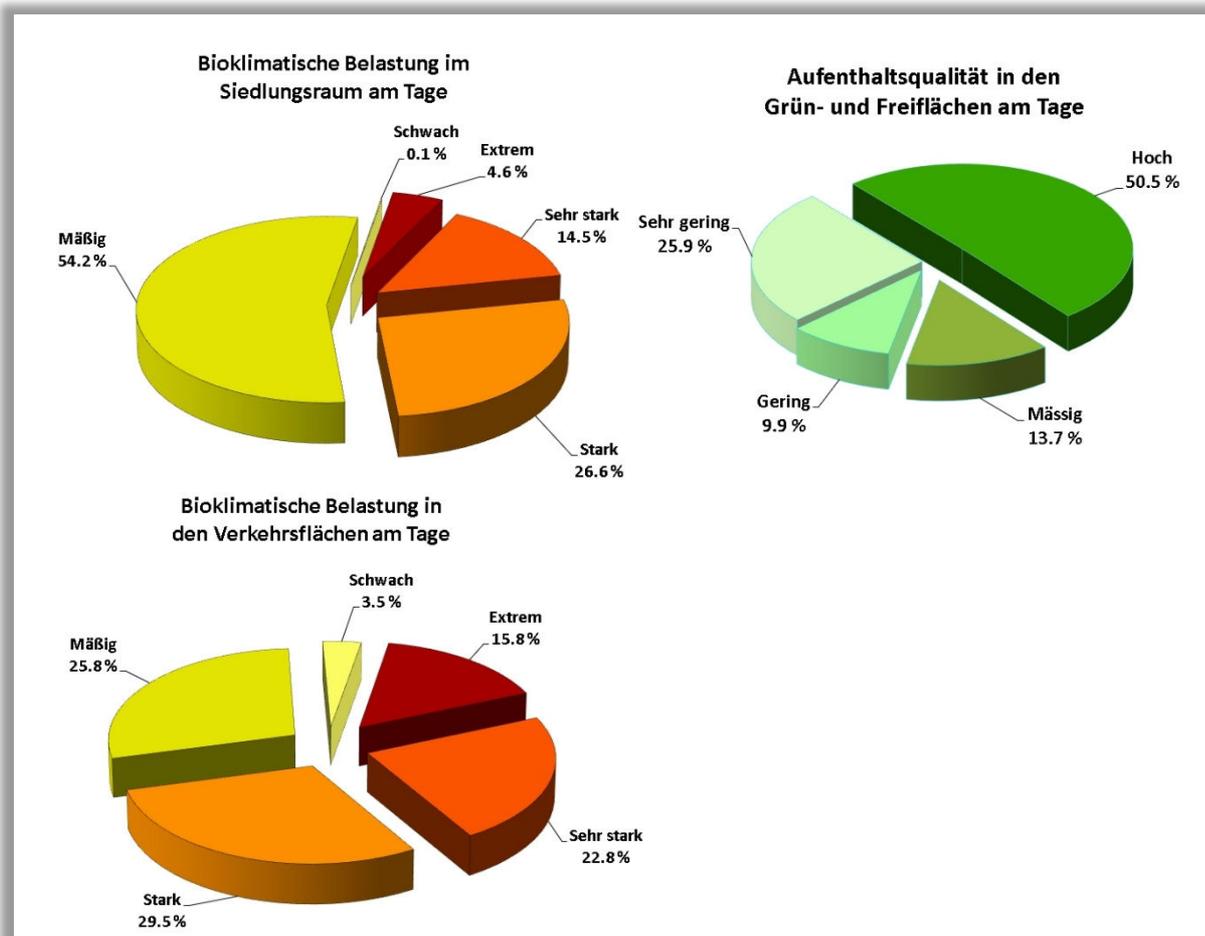


Abb. 6.4: Flächenanteile der bewerteten Nutzungsstrukturen im Stadtgebiet Bern (Tagsituation) – Zukunftsszenario 2060



7 Kaltluftsystem

Die Teilkarte Kaltluftsystem fokussiert sich auf das Kaltluftsystem, wobei die vegetationsbestandenen Freiflächen mit einer nennenswerten Kaltluftproduktion klimaökologische Ausgleichsräume darstellen und über Kaltluftabflüsse die Wärmebelastung in den Siedlungsflächen verringern können. Eine hohe langwellige nächtliche Ausstrahlung während austauscharmer Hochdruckwetterlagen führt zu einer starken Abkühlung der bodennahen Luftschicht. Dabei werden vor allem die ausgedehnten Hangbereiche als Zonen einer sehr hohen Kaltluftlieferung sichtbar. Dies ist auf die intensive Abkühlung zurückzuführen, die mit entsprechenden Kaltluftvolumina einhergehen.

Somit führen unterschiedliche Struktureigenschaften der Grünflächen zu einem Mosaik aus Flächen unterschiedlicher Kaltluftdynamik. Die einzelnen (Teil-) Elemente innerhalb des Kaltluftsystems mit Bezug zu Siedlungsflächen im Stadtgebiet werden in der Karte Kaltluftsystem (Abb. 7.2) detaillierter betrachtet.

Strukturen, die den Luftaustausch ermöglichen und Kaltluft an die Siedlungsbereiche heranführen, sind das zentrale Bindeglied zwischen Ausgleichsräumen und bioklimatisch belasteten Wirkungsräumen. Kaltluftleitbahnen sollten daher einen generell geringen Überbauungsgrad und einen hohen Grünflächenanteil aufweisen sowie linear auf Wirkungsräume ausgerichtet sein. Grundsätzlich kommen Tal- und Niederungsbereiche, größere Freiräume aber auch ausgedehnte Gleisareale als geeignete Strukturen in Frage.

Innerhalb des Kaltluftsystems lassen sich zwei Prozesstypen untergliedern (Abb. 7.1). Die Ergebnisse zeigen, dass im Stadtgebiet Bern ein flächenhaftes Einwirken von Kaltluft als Hangabwinde dominiert. Einige Grünachsen treten durch eine lineare bodennahe Windströmung als Sonderleitbahnen hervor. Als lokale Durchlüftungsbereiche können die folgenden Strukturen ausgewiesen werden:

- Grünflächenverbund Friedhof Bümpliz **(A)**
- Sportplatz Bodenweid **(B)**
- Grünflächenverbund Könizbergerwald – Schloss Holligen – Bremgartenfriedhof **(C)**
- Bereich Schlosshaldenfriedhof – Wyssloch **(D)**

Es werden Hangabwinde ausgewiesen, die von ausserhalb in das Stadtgebiet einwirken sowie jene, welche innerhalb des Stadtgebietes generiert werden. Die Kaltluft entsteht einerseits über grösseren Grünflächen, andererseits aber auch in durchgrüntem, gering überwärmten und damit klimatisch wirksamen Siedlungsflächen.

Die Kaltluftabflüsse, welche sich hangabwärts an den sich anschliessenden Tiefenlinien orientieren und über Grünflächen weit in die Bebauung einwirken, werden als Talabwinde bezeichnet. Während die Bereiche mit sehr hohem Kaltluftvolumenstrom als primäre Leitbahnen abgegrenzt werden, weist der sekundäre Leitbahnbereich noch einen hohen Volumenstrom auf. Der Einwirkbereich setzt sich mit einem mittleren Volumenstrom innerhalb der Bebauung weiter fort. Der Leitbahnbereich endet dort, wo sich im bodennahen Bereich das Windfeld ein Einströmen aus einer anderen Richtung erkennen lässt, und der Einfluss des Talabwindes abgeklungen ist. Dahingehend lässt sich das Aaretal südlich der unteren Altstadt **(E)** sowie die Freiflächen im Umfeld des Schlosses Wittigkofen **(F)** ausweisen.

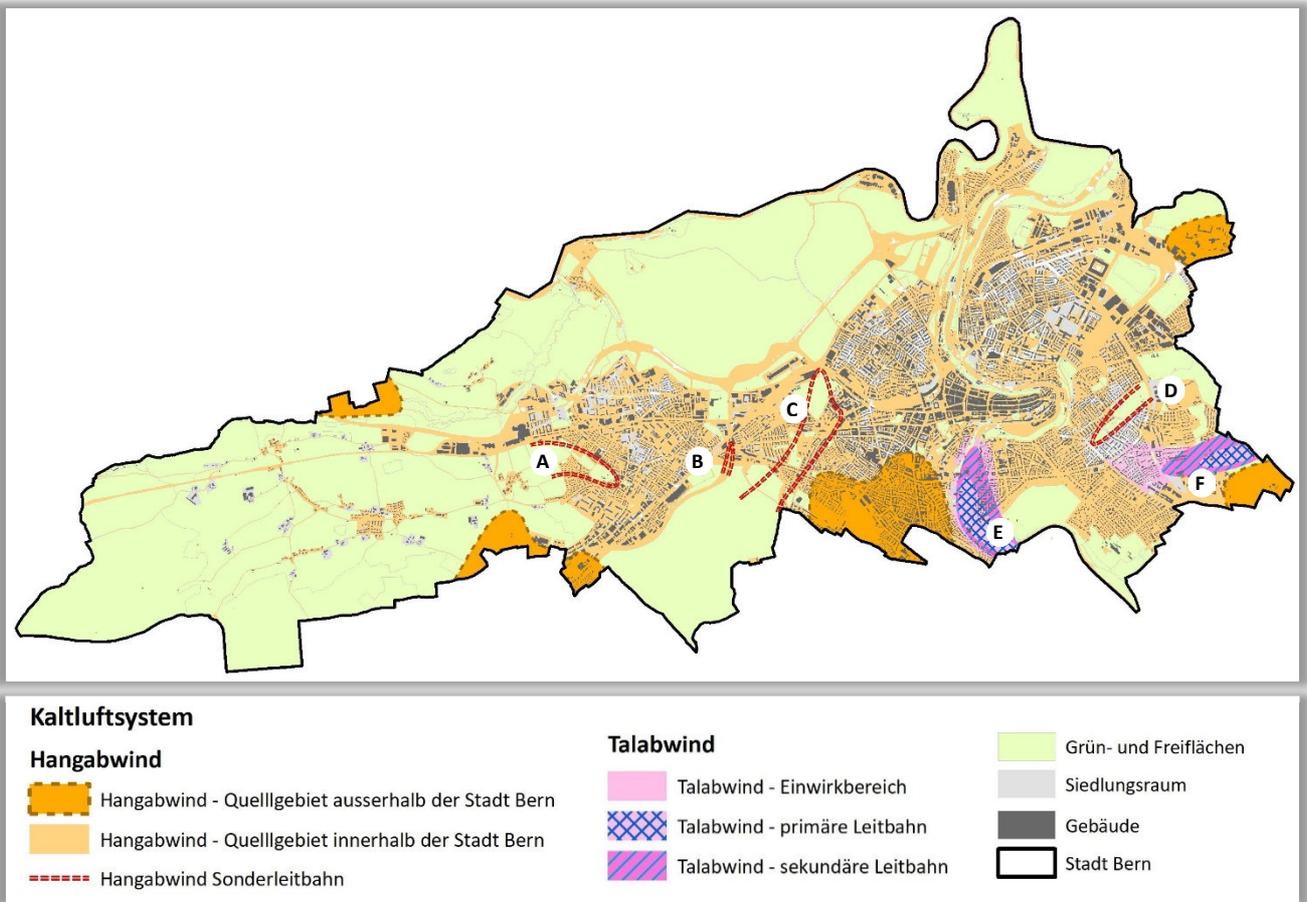


Abb. 7.1: Gegenwärtiges Kaltluftsystem im Stadtgebiet Bern



8 Massnahmenkatalog Siedlungsklima

Für die Stadt Bern wurde ein Katalog aus 19 klimaökologisch wirksamen Einzelmassnahmen zur Anpassung an stadtklimatisch bedingte Belastungen resp. Defizite der Aufenthaltsqualität ausgewiesen. Die Zuordnung bestimmter Massnahmensets in die u.g. drei Cluster aus dem Portfolio der 19 Einzelmassnahmen hängt vom Flächentyp und den Bewertungen in den Planungshinweiskarten (z.B. bioklimatische Belastung in der Nacht und/oder am Tage, Bedeutung für den Kaltlufthaushalt) ab. Sie gehen über die in Kapitel 6 formulierten allgemeinen Hinweise hinaus und sind als Planungsempfehlungen zu verstehen, die bei Betrachtung einer konkreten Fläche oder spezifischen Massnahme einer genaueren Überprüfung bedürfen (z.B. beruht die Empfehlung Dachbegrünung auf der siedlungsklimatischen Situation, ohne zu berücksichtigen, ob deren bauliche Umsetzung tatsächlich möglich wäre). Die Massnahmen sind stichpunktartig in Tab. 8.1 beschrieben und in verschiedene Cluster aufgeteilt:

- Thermisches Wohlbefinden im Aussenraum
- Verbesserung der Durchlüftung
- Reduktion der Wärmebelastung im Innenraum

Die Wirkung der Massnahmen wird qualitativ beschrieben, da verifizierte Daten nur sehr vereinzelt für ganz spezielle Fallstudien zur Verfügung stehen. Zudem hängt die Wirkung stark von der konkreten Ausgestaltung der Massnahmen, ihrer Lage im Stadtgebiet sowie der betrachteten vertikalen und horizontalen Entfernung von der Massnahme ab. Grundsätzlich sind alle Massnahmen geeignet, den thermischen Stress für die Stadtbevölkerung direkt oder indirekt zu verringern und damit zur Erreichung eines gesunden Siedlungsklimas beizutragen. Werden die Massnahmen kombiniert, verstärken sich in der Regel die positiven siedlungsklimatischen Effekte der einzelnen Massnahmen.

8.1 Erhöhter Grünanteil im Stadtgebiet

Soweit möglich sollte der **Grünanteil** im Stadtgebiet erhöht werden, insbesondere in thermisch belasteten Bereichen (→ M01: Innen-/Hinterhof-Begrünung, → M02: Öffentliche Grünräume schaffen). Wasserversorgte strukturreiche Grünflächen (mit Bäumen, Sträuchern) wirken sich durch ihre Verdunstung positiv auf das Umgebungsklima aus und erhöhen durch ihren Schattenwurf die Aufenthaltsqualität (→ M07: Öffentliche Grünflächen entwickeln oder vorhandene optimieren). Im Vergleich zu wärmespeichernden städtischen Baumaterialien kühlen Grünflächen nachts deutlich schneller ab und können (ab einer gewissen Grösse) als Kaltluftentstehungsgebiete auf ihr (nahes) Umfeld wirken. Gleichzeitig erfüllen sie viele weitere Funktionen wie die Möglichkeit zur Erholung, die Erhöhung der Biodiversität und Synergieeffekte zum Niederschlagsmanagement (Versickerung) und zur Luftreinhaltung (Deposition von Luftschadstoffen).

WEITERE HINWEISE ZUR AUFENTHALTSQUALITÄT VON GRÜNFLÄCHEN

Eine intensive Begrünung des Strassenraums und die Aufwertung der Bestandsbebauung mit Bäumen steigern die Aufenthaltsqualität im Freien beträchtlich. Damit werden grosse beschattete Bereiche geschaffen, die das Gehen/Radfahren im Schatten ermöglichen. Dieser Aspekt hat auch dahingehend



Relevanz, die Erreichbarkeit von siedlungsnahen Grünflächen an Sommertagen mit starker solarer Einstrahlung zu verbessern.

Im Übergangsbereich einer Grünfläche zur Bebauung sollte allerdings auf dichte Vegetationselemente wie Gehölze und Hecken verzichtet werden, da diese die bodennahe Kaltluftströmung beeinträchtigen können. Ein weiteres klimaausgleichendes Gestaltungselement können Brunnenanlagen in Platzbereichen bzw. Freiflächen darstellen, die durch Grünelemente ergänzt werden. Insbesondere die Temperaturspitzen können kleinräumig durch die durch Wasserflächen erzeugte Verdunstungskälte reduziert werden und die Aufenthaltsqualität im Freien verbessern. Für die strukturelle Ausgestaltung der Grünanlagen lassen sich die folgenden Hinweise geben:

Innerstädtische Grün- und Freiflächen sollten möglichst vielfältige Mikrokimate bereitstellen, wobei als Leitbild der erweiterte „Savannentyp“ dienen kann (KUTTLER 2013). Er besteht zu einem grossen Anteil aus



gut wasserversorgten Rasenflächen und kleinen Baumgruppen, die mit offenen multifunktionalen Wasserflächen (z.B. Wasserspielplatz und Retentionsraum für Starkregenereignisse), Hügellandschaften, verschatteten Wegen und Sitzgelegenheiten sowie weiteren Strukturmerkmalen (Beete, Rabatten, Blumenwiesen, Sukzessionsflächen) angereichert sind (Abb. 8.1). Ziel sollte sein, möglichst vielgestaltige „Klimaoasen“ zu schaffen, welche ein abwechslungsreiches Angebot für die unterschiedlichen Nutzungsansprüche der Menschen (z.B. windoffene und windgeschützte Bereiche, offene „Sonnenwiesen“, beschattete Bereiche) darstellen. Durch diese heterogene Anordnung wird sichergestellt, dass sowohl die nächtliche Abkühlung der Luft als auch der Aufenthalt am Tage für alle Zielgruppen optimiert ist.

Abb. 8.1: Klimatisch günstige Ausgestaltung von Freiflächen

8.2 Bäume im Strassenraum

Neben ihrem Potential zur Verringerung der thermischen Belastung am Tage und in der Nacht (Schattenwurf, Verdunstung, etc.), übernehmen **Bäume** (und Sträucher) im Strassenraum die Funktion der Deposition und Filterung von Luftschadstoffen und verbessern dadurch die Luftqualität. Bei der Umsetzung entsprechender Massnahmen sollte darauf geachtet werden, dass der (vertikale) Luftaustausch erhalten bleibt, um Schadstoffe abzutransportieren und die nächtliche Ausstrahlung zu gewährleisten. Geschlossene Kronendächer sind daher insbesondere bei kleinen Strassenquerschnitten und hohem motorisierten



Verkehrsaufkommen zu vermeiden. Bei mehrspurigen Strassen bieten sich begrünte Mittelstreifen zur Baumpflanzung an. Im Bereich von Leitbahnen sollten Verschattungselemente zudem keine Barriere für Kalt- und Frischluftströmungen darstellen und daher möglichst nicht quer zur Fliessrichtung angelegt werden. Dabei sind solche Gehölze zu bevorzugen, die keine hohen Emissionen an flüchtigen organischen Stoffen, die zur Bildung von Ozon beitragen, aufweisen. Grosskronige Laubbäume sind Nadelbäumen vorzuziehen, da sie im Winter geringeren Einfluss auf die Einstrahlung ausüben und dadurch zu einer Reduktion von Heizenergie und damit von Heizkosten und Treibhausgasemissionen führen können. Mit Blick auf den Klimawandel sollte bei der Artenauswahl von Neu- oder Ersatzpflanzungen auf deren Hitze- und Trockenheitstoleranz geachtet werden (vgl. „Projekt Zukunftsbäume“ der Stadt Bern⁵; „Projekt Stadtgrün 2021“ der LWG Bayern⁶ oder GALK-Strassenbaumliste⁷).

8.3 Verschattungsmassnahmen

Massnahmen zur Verschattung verringern die durch direkte Sonneneinstrahlung bedingte thermische Belastung am Tage. Beschattete Strassen, Fuss- und Radwege oder Parkplätze speichern weniger Wärme als die der Sonnenstrahlung ausgesetzten versiegelten Freiflächen (→ M05: Begrünung und Verschattung von Parkplätzen). Bei grossflächiger Verschattung kann somit auch der nächtliche Wärmeineffekt und damit die thermische Belastung angrenzender Wohnquartiere reduziert werden (→ M17: Verschattung von Gebäuden durch Bäume oder bautechnische Massnahmen).

8.4 Klimaangepasstes Bauen

Klimaangepasstes Bauen enthält viele der bisher genannten Massnahmen und ist am einfachsten bei Neubauten umzusetzen, doch auch im Bestand und bei Nachverdichtung sind Massnahmen zur Verbesserung bzw. Berücksichtigung siedlungsklimatischer Belange möglich. Im Neubau bietet sich die Chance, die Gebäudeausrichtung zu optimieren und damit den direkten Hitzeeintrag zu reduzieren. Unter Berücksichtigung der Sonnen- und Windexposition sollten Gebäude so ausgerichtet werden, dass in sensiblen Räumen wie z.B. Schlafzimmern (oder auch Arbeitszimmer/Büroräume) der sommerliche Hitzeeintrag minimiert wird (→ M19: Anpassung des Raumnutzungskonzeptes). Umso mehr gilt dies für sensible Gebäudenutzungen wie z.B. Krankenhäuser oder Pflegeheime. Durch geeignete Gebäudeausrichtung kann darüber hinaus eine gute Durchlüftung mit kühlender Wirkung beibehalten bzw. erreicht werden (Ausrichtung parallel zur Kaltluftströmung, Vermeidung von Querriegeln zur Strömungsrichtung, ausreichend (grüne) Freiflächen zwischen den Gebäuden; → M11: Baukörperstellung und Abstandsflächen beachten). Auch die Verwendung geeigneter Baumaterialien lässt sich im Wesentlichen nur bei Neubauten realisieren. Dabei ist auf deren thermische Eigenschaften zu achten – natürliche Baumaterialien wie Holz haben einen geringeren Wärmeumsatz und geben entsprechend nachts weniger Energie an die Umgebungsluft ab als z.B. Stahl oder Glas. Auch die Albedo kann über die Wahl entsprechender Baumaterialien beeinflusst werden, so ist die Reflektion der solaren Einstrahlung auf hellen Oberflächen grösser, sodass sich diese weniger stark

⁵ www.bern.ch/themen/umwelt-natur-und-energie/stadtnatur/baume/stadtbaeume-schuetzenmatte

⁶ www.lwg.bayern.de/landespflge/urbanes_gruen/085113/index.php (Abruf 12.08.2019)

⁷ www.galk.de/index.php/arbeitskreise/stadtbaeume/themenuuebersicht/strassenbaumliste (Abruf 12.08.2019)



aufheizen (→ M03: Oberflächen im Aussenraum klimaoptimiert gestalten). Bautechnische Massnahmen zur Verbesserung des Innenraumklimas wie Dach- und Fassadenbegrünung, Verschattungselemente⁸ oder energetische Sanierung⁹ sind dagegen auch im Bestand umsetzbar und bieten vielfach Synergieeffekte zum Energieverbrauch der Gebäude (→ M15, M16, M17, M18).

8.5 Klimagerechtes Nachverdichten

Bei **Nachverdichtung** sollten die Belange klimaangepassten Bauens berücksichtigt werden (insb. die Gewährleistung einer guten Durchlüftung). In der Regel stellt die vertikale Nachverdichtung dabei die aus siedlungsklimatischer Sicht weniger belastende Lösung dar, wobei die genaue Ausgestaltung jeweils im Einzelfall geprüft werden muss. Um Nachverdichtung möglichst klimaverträglich zu gestalten, ist die sogenannte *doppelte Innenentwicklung* in den Blickpunkt geraten (BfN 2016). Ziel ist es, die Flächenreserven im Siedlungsraum nicht nur baulich, sondern auch mit Blick auf das urbane Grün zu entwickeln. Damit bildet diese auch Schnittstellen zum Städtebau, der Freiraumplanung und dem Naturschutz. Dahingehend weisen vor allem die Siedlungsflächen mit geringer bis mässiger nächtlicher Überwärmung ein Entwicklungspotenzial auf. Dabei handelt es sich vor allem um Bebauungstypologien mit Reihenhaus- und Zeilenbebauung. Aufgrund des im Vergleich zu Innenstadtlagen geringen Überbauungsgrad bieten sich Chancen, im Zuge einer weiteren Verdichtung auch Grünareale mit hoher Aufenthaltsqualität am Tage zu realisieren.

8.6 Massnahmenübersicht

Eine räumliche Zuordnung der in Tab. 8.1 zusammengestellten Massnahmen kann näherungsweise über die Belastungssituation am Tage bzw. in der Nacht erfolgen. So sind Massnahmen zur Verbesserung der Aufenthaltsqualität im Freien vor allem dort prioritär, wo die thermische Belastung sehr stark ausgeprägt ist. Gleiches gilt für den gebäudebezogenen Wärmeschutz.

Mit Blick auf die Verbesserung der Durchlüftung in den Nachtstunden sind Massnahmen in Bereichen mit ausgeprägter nächtlicher Überwärmung bzw. ungünstigen / sehr ungünstigen Bedingungen sinnvoll. Einige urban geprägte Siedlungsflächen wie in Biel oder Biel weisen allerdings sowohl am Tage als auch in der Nacht bioklimatisch ungünstige Bedingungen auf. In den Bereichen ohne nennenswertes Einwirken von Kaltluft kommt mit Blick auf das stark versiegelte Umfeld der flächeninternen Abkühlung eine besondere Rolle zu: Durch ein günstiges „Binnenklima“ wird die Überwärmung während sommerlicher Hitzeperioden insgesamt abgefedert. Dies kommt sowohl dem Aufenthalt im Freien am Tage als auch einem erholsamen Schlaf in nur mässig überwärmten Wohnräumen zugute.

⁸ Bäume, Vordächer, Markisen, Jalousien/Aussenrollos, Sonnensegel, Sonnenschutzglas, etc.

⁹ Wirkt nicht nur Energieverlusten im Winter entgegen, sondern auch gegen übermässiges Aufheizen der Fassaden im Sommer.

Tab. 8.1: Empfehlungen raumeinheitenspezifischer siedlungsklimatisch wirksamer Massnahmen für die Stadt Bern

Nr.	Massnahme	Erläuterung	Wirkung	Räumliche Umsetzung
THERMISCHES WOHLBEFINDEN IM AUSSENRAUM				
01	Innen-/Hinterhofbegrünung	Grüne Innenhöfe können die Wärmebelastung gerade auch in den urban geprägten Bereichen kleinräumig verbessern. Hier sollte ggf. der Vegetationsanteil erhöht bzw. eine Entsiegelung vorgenommen werden.	<ul style="list-style-type: none"> Reduktion der Wärmebelastung tagsüber und nachts Synergien zum Niederschlagsmanagement und zur Biodiversität 	Hinterhöfe
02	Öffentliche Grünräume im Wohn- und Arbeitsumfeld schaffen	z.B. kleine Parks und gärtnerisch gestaltete Grünflächen im innerstädtischen Raum, die auch Erholung bieten.	<ul style="list-style-type: none"> Reduktion der Wärmebelastung tagsüber und nachts Vernetzung von Grünflächen Synergien zum Niederschlagsmanagement und zur Biodiversität 	Baulücken, grössere Hinterhöfe (insb. in thermisch belasteten Wohngebieten)
03	Oberflächen im Aussenraum klimaoptimiert gestalten	Helle Farben (insbesondere von Dächern) und Baumaterialien, die wenig Wärme speichern, Asphaltflächen minimieren.	<ul style="list-style-type: none"> Reduktion der Wärmebelastung tagsüber und nachts 	Dächer (Neubau und Bestand), ggf. Strassen, Wege, Plätze
04	Entsiegelung	Rasenflächen oder Teilversiegelung schaffen (Schotter, Rasengittersteine, etc.)	<ul style="list-style-type: none"> Reduktion der Wärmebelastung tagsüber und insb. nachts Synergien zum Niederschlagsmanagement 	Strassen, Wege, Plätze, Innen- und Hinterhöfe, Vorgärten, Betriebshöfe
05	Verschattung im Strassenraum	Bäume erhalten, pflanzen oder bautechnische Massnahmen realisieren (Storen, Überdachung der Haltestellen, Sonnensegel, etc.)	<ul style="list-style-type: none"> Reduktion der Wärmebelastung insb. tagsüber und nachts 	Strassen, Wege, Plätze
06	Begrünung und Verschattung von Parkplätzen	Parkplätze mit Bäume, Sträucher oder Überdachung ausstatten.	<ul style="list-style-type: none"> Reduktion der Wärmebelastung insb. tagsüber und nachts Deposition und Filterung von Luftschadstoffen Synergien zum Niederschlagsmanagement und zur Biodiversität 	Parkplätze
07	Öffentliche Grünflächen entwickeln und optimieren	Mikroklimavielfalt schaffen durch Neuschaffen von oder Ausbau/Umgestaltung vorhandener Grünflächen (offene Wiesenflächen, Bäume, Wasserflächen, Pflanzungen).	<ul style="list-style-type: none"> Reduktion der Wärmebelastung tagsüber und nachts Synergien zur Biodiversität 	Grün- und Freiflächen, Strassen, Wege, Plätze

08	Schutz bestehender Parks, Grün- und Waldflächen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bedeutung für den Kaltlufthaushalt ▪ Wichtige Funktionen für die Erholung, Biodiversität und Niederschlagsmanagement 	Grün- und Freiflächen (insb. im Umfeld hoher Einwohnerdichten)
09	Offene, bewegte Wasserflächen schützen, erweitern und anlegen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Stadtklimafunktion grösserer Fliess- und Standgewässer ▪ Rauigkeitsarme Ventilationsbahnen, über die v.a. bei allochthonen Wetterlagen Kalt- und Frischluft transportiert wird ▪ Während der Sommermonate und speziell Hitzeperioden wirken Gewässer auf ihr nahes Umfeld tagsüber kühlend (auch kleinere Gewässer, Wasserspielplätze oder Brunnen in Parks) ▪ Die Lufttemperatur über warmen Wasserflächen kann nachts höher sein als in der Umgebung und daher eine Wärmeabgabe im näheren Umfeld der Wasserfläche bewirken 	Gewässer, Grün- und Freiflächen
10	Ausbau sozialer Infrastruktur und Netzwerke	<p>Partizipative Projekte (z.B. Quartiersmanagement) oder aus Bevölkerung heraus (z.B. Trinkpatenschaften, Urban Gardening)</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Minderungen der Vulnerabilität der Quartiersbevölkerung gegenüber thermischem Stress 	(thermisch belastete) Quartiere hoher Einwohnerdichte
VERBESSERUNG DER DURCHLÜFTUNG			
11	Baukörperstellung und Abstandsflächen beachten	<p>Gebäudeanordnung parallel zur Kaltluftströmung und/oder ausreichend (grüne) Freiflächen zwischen der Bebauung (aufgelockerte Bebauung)</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Verbesserung der Kaltluftströmung / Durchlüftung ▪ Reduktion des Wärmestaus 	Neubau, Gebäudekomplexe (auf winterliche Behaglichkeit in den Innenräumen achten)
12	Entdichtung (Rückbau)	<p>Rückbau von Gebäuden zugunsten unversiegelter Frei-/Grünflächen verringert die Bebauungsdichte und das Bauvolumen</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Reduktion der Wärmebelastung insb. nachts ▪ Verbesserung der Durchlüftung ▪ Synergien zum Niederschlagsmanagement 	Blockinnenhöfe (Garagen, Lagerhallen, ggf. Industrie- und Gewerbebrachen, Bahnanlagen)
13	Vermeidung von Austauschbarrieren	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Quer zur Fliessrichtung der Kaltluft verlaufende bauliche (Dämme, Gebäude) oder natürliche Hindernisse (Baumgruppen, jedoch Beibehaltung bestehender Gehölze!) im Einflussbereich von Kaltluftflüssen vermeiden bzw. Gebäudeausrichtung und Bebauungsdichte auf klimaökologische Belange anpassen ▪ Schutz des Luftaustauschsystems 	Grün- und Freiflächen, gut durchlüftete Wohn- und Gewerbeflächen, Strassen, Wege, Plätze
14	Schutz und Vernetzung für den Kaltlufthaushalt relevanter Flächen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Schutz vor stärkerer Überwärmung und Verschlechterung der Durchlüftung ▪ Freihaltung grossräumiger, möglichst wasserversorgter und durch flache Vegetation geprägter Grünflächen wie Wiesen, Felder, Kleingärten und Parklandschaften (im Aussen- und Innenbereich), die Einfluss auf den lokalen Kaltlufthaushalt haben ▪ Kleine Parks als Trittsteine für Kaltluft ▪ Synergien zur Biodiversität 	Grün- und Freiflächen

REDUKTION DER WÄRMEBELASTUNG IM INNENRAUM

15	Dachbegrünung	Extensive oder intensive Dachbegrünung (bis hin zu Gärten und urbaner Landwirtschaft auf Dächern; unter Bevorzugung heimischer Pflanzen), blaugüne Dächer (im Wasser stehende Pflanzen)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Verbesserung des Innenraumklimas ▪ Bei grossflächiger Umsetzung und geringer Dachhöhe Verbesserung des unmittelbar angrenzenden Aussenraumklimas möglich ▪ Synergien zum Niederschlagsmanagement, Biodiversität und Klimaschutz 	Flachdächer, ggf. flach geneigte Dächer
16	Fassadenbegrünung	Boden- oder systemgebundene Fassadenbegrünung (Bevorzugung heimischer bzw. bienenfreundlicher Pflanzen)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Verbesserung des Innenraumklimas und des unmittelbar angrenzenden Aussenraumklimas ▪ Synergien zur Luftreinhaltung, Biodiversität, Lärm- und Gebäudeschutz 	Gebäude (Neubau und Bestand; soweit rechtlich zugelassen)
17	Verschattung von Gebäuden durch Bäume oder bautechnische Massnahmen	Fassadenbegrünung, Bäume, Balkongestaltung, bautechnische Massnahmen wie aussen liegende Sonnenschutzelemente (Jalousien, Storen etc.), reflektierendes Sonnenschutzglas bzw. -folie, geeignete Raumlüftung (Verhalten der Bewohner)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Wirkung tagsüber und nachts ▪ Verbesserung des Innenraumklimas ▪ Synergien zum Klimaschutz 	Gebäude, v.a. Südfassaden und in Bezug auf Fenster- und sonstige Glasflächen (Neubau und Bestand)
18	Gebäude energetisch sanieren und klimagerecht kühlen	Dämmung von Gebäuden, Erhöhung der Albedo	<ul style="list-style-type: none"> ▪ In erster Linie Klimaschutzmassnahme ▪ Verbesserung des Innenraumklimas tagsüber 	Gebäude (Bestand)
19	Anpassung des Raumnutzungskonzeptes	Optimierung der Gebäudeausrichtung und der Nutzung von Innenräumen, d.h. sensible Räume nicht nach Süden ausrichten (z.B. Schlaf-, Arbeits- oder von Risikogruppen genutzte Zimmer (etwa im Krankenhaus))	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Verbesserung des Innenraumklimas (in sensiblen Räumen) 	Gebäude, insb. klimasensible Gebäudenutzungen (vorwiegend Neubau)



9 Literatur

- Begert, M.; Frei, C.; Abbt, M. (2013): Einführung der Normperiode 1981-2010 - MeteoSchweiz. Hg. v. Meteoschweiz (245).
- Begert, M.; Stöckli, R.; Croci-Maspoli, M. (2019): Klimaentwicklung in der Schweiz - Vorindustrielle Referenzperiode und Veränderung seit 1864 auf Basis der Temperaturmessung. Fachbericht. Hg. v. Meteoschweiz (274).
- Boden T.A., Marland G., Andres R.J. (2017): Global, Regional, and National Fossil-Fuel CO2 Emissions. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge Nation-al Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., U.S.A.
- DFG (1988) – Deutsche Forschungsgemeinschaft: Physikalische Grundlagen des Klimas und Klimamodelle. Abschlussbericht. Bonn.
- DWD (2017) – Deutscher Wetterdienst: Klimawandelgerechte Metropole Köln. Abruf: 28.03.2018. http://www.dwd.de/DE/forschung/klima_umwelt/klimawirk/stadtpl/projekt_koeln/stadtpl_koeln_node.html
- DWD (2016) – Deutscher Wetterdienst: Nationaler Klimareport 2016. Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main, Deutschland, 40 Seiten.
- GROSS, G. (1989): Numerical simulation of the nocturnal flow systems in the Freiburg area for different topographies. Beitr. Phys. Atmosph. , H 62 , S. 57-72.
- GROSS, G. (1993): Numerical Simulation of canopy flows. Springer Verlag Heidelberg.
- GROSS, G. (2002): The exploration of boundary layer phenomena using a nonhydrostatic mesoscale model. Meteor. Z.schr. Vol. 11 Nr. 5., S. 701-710.
- JENDRITZKY, G., et al. 1990. Methodik zur raumbezogenen Bewertung der thermischen Komponente im Bioklima des Menschen (Fortgeschriebenes Klima-Michel-Modell). Beitr. Akad. Raumforsch. Landesplan. Nr. 114.
- KIESE, O. et al. (1992): Stadtklima Münster. Entwicklung und Begründung eines klimarelevanten Planungskonzeptes für das Stadtgebiet von Münster. Stadt Münster - Werkstattberichte zum Umweltschutz 1/1992
- KUTTLER, W. (1999): Human-biometeorologische Bewertung stadtklimatologischer Erkenntnisse für die Planungspraxis. In: Wissenschaftliche Mitteilungen aus dem Institut für Meteorologie der Universität Leipzig und dem Institut für Troposphärenforschung e. V. Leipzig. Band 13.
- KUTTLER, W. (2013): Klimatologie. Kapitel: Lokale Massnahmen gegen den globalen Klimawandel. Paderborn: Schöningh (2. Auflage).
- NCCS (Hrsg.) 2018: CH2018 – Klimaszenarien für die Schweiz. National Centre for Climate Services, Zürich. Online verfügbar unter <https://www.nccs.admin.ch/nccs/de/home/materialien-und-daten/daten/ch2018-webatlas.html>, Abgerufen am 22.06.2022.
- Meteoschweiz (2020b): Klimanormwerte Bern / Zollikofen. Normperiode 1991 - 2020. Online verfügbar unter <https://www.meteoschweiz.admin.ch/home/klima/schweizer-klima-im-detail/klima-normwerte/klimadiagramme-und-normwerte-pro-station.html?station=ber>. Abgerufen am 22.06.2022.



- Meteoschweiz (Hg.) (2020c): Windrosen pro Station. Online verfügbar unter <https://www.meteoschweiz.admin.ch/home/klima/schweizer-klima-im-detail/klima-normwerte/windrosen-pro-station.html?region=Tabelle>. Abgerufen am 23.06.2022.
- Meteoschweiz (2020d): Zeitliche Entwicklung von Temperatur und Niederschlag. Online verfügbar unter https://www.meteoschweiz.admin.ch/home/klima/klimawandel-schweiz/temperatur-und-niederschlagsentwicklung.html?filters=ths200m0_northlow_jja_1864-trend. Abgerufen am 22.06.2022.
- MOSIMANN, Th., P. TRUTE & Th. FREY (1999): Schutzgut Klima/Luft in der Landschaftsplanung. Informationsdienst Naturschutz Niedersachsen, Heft 4/99, S. 202-275.
- Moss R. H., Edmonds J. A., Hibbard K. A., Manning M. R., Rose S. K., van Vuuren D. P., Carter T. R., Emori S., Kainuma M., Kram T., Meehl G. A., Mitchell J. F. B., Nakicenovic N., Riahi K., Smith S. J., Stouffer R. J., Thomson A. M., Weyant J. P., Wilbanks T. J. (2010): The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature* 463, 747–756.
- VDI (2004): VDI-Richtlinie 3787 Blatt 9. Umweltmeteorologie. Berücksichtigung von Klima und Lufthygiene.
- VDI (2008a): VDI-Richtlinie 3785 Blatt 1. Umweltmeteorologie. Methodik und Ergebnisdarstellung von Untersuchungen zum planungsrelevanten Stadtklima.
- VDI (2008b): VDI-Richtlinie 3787 Blatt 2. Umweltmeteorologie. Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung von Klima und Lufthygiene für die Stadt- und Regionalplanung. Teil I: Klima.
- VDI (2014): VDI-Richtlinie 3787 Blatt 1. Umweltmeteorologie. Klima- und Lufthygienekarten für Städte und Regionen. Entwurf.